



**Rui Emanuel
Rodrigues Pacheco**

**Análise da qualidade de furação na liga de Alumínio
AA2011**



**Rui Emanuel
Rodrigues Pacheco**

**Análise da qualidade de furação na liga de Alumínio
AA2011**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Associado c/ Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

O júri/ The jury

Presidente / President

Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva
Professor Associado c/ Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

**Agradecimentos /
Acknowledgements**

Queria expressar o meu agrado pelo apoio de todos os que possibilitaram a conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Doutor João Paulo Davim pela orientação fornecida.

Ao Engenheiro António Festas pela colaboração técnica.

Ao Engenheiro Carlos Lauro pelos conselhos e auxílio.

palavras-chave

Liga de Alumínio AA2011, furação, rebarba, acabamento de superfície, otimização.

resumo

O alumínio continua a ser um material de eleição no que toca a aplicação nas mais variadas indústrias. A sua baixa densidade, aliada às suas propriedades específicas tem captado a atenção de muitos investigadores.

O processo da furação está intrínseco aos mais variados componentes / produtos, uma vez que permite a passagem de elementos de ligação, funcionais e outros.

Neste trabalho pretende-se analisar a furação da liga de Alumínio AA2011.

Foi estudada a formação de rebarba, a variação do diâmetro e o acabamento de superfície no furo obtido.

Parâmetros processuais, como a velocidade de corte e velocidade de avanço, foram otimizados.

A análise foi ampliada, permitindo perceber a ação de um lubrificante e o efeito de velocidades de avanço elevadas.

Foi aplicado um método estatístico (DOE, "design of experiments"), para trabalhar os resultados e permitir otimizá-los.

keywords

Aluminium 2011, drill, burr, surface finish, optimization.

abstract

The aluminum remains a material of choice as regards the application in various industries. Its low density, combined with its specific properties has captured the attention of many researchers. The drilling process is intrinsic to the various components / products, since it allows the passage of binding elements, functional and others.

This work is intended to analyze the drilling of Aluminum alloy AA2011. Burr formation was studied, as well the variation of the diameter and surface finish. Process parameters such as cutting speed and feed rate, were optimized. The analysis was extended, allowing to understand the action of a lubricant and the effect of the high feed.

A statistical method was applied (DOE, design of experiments) to work the results collected and optimize it.

Índice

1 Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Conteúdo	4
2 A Furação das ligas de Alumínio - Estado da arte	5
2.1 Material de excelência	5
2.2 Métodos e Processos de Maquinagem aplicados no Alumínio	8
2.3 Estudo da Furação no Alumínio	10
2.3.1 Ferramentas e Geometria de Corte	12
2.3.2 Parâmetros Processuais.....	14
2.3.3 Furação a Seco vs Lubrificada.....	16
2.3.4 Otimizações no Processo de Furação.....	18
2.3.5 Investigações da Furação no Alumínio	19
2.4 Síntese:	21
3 Metodologia Experimental	25
3.1 Alumínio 2011.....	26
3.2 Centro de Maquinagem	27
3.3 Brocas Helicoidais	28
3.4 Lubrificante	29
3.5 Provetes e Sistema de Fixação	29
3.6 Ensaios.....	31
3.6.2 Seleção dos Parâmetros Processuais	31
3.6.2 Características dos Ensaios.....	32
3.7 Análise do Acabamento.....	33
3.7.1 Rugosidade	33
3.7.2 Diâmetro e formação de Rebarba	34
3.8 Tratamento dos Resultados (Análise Estatística)	35
4 Resultados e sua discussão	37
4.1 Parâmetros Processuais.....	37
4.1.1 Segundo os parâmetros recomendados.....	39
4.1.2 Aplicando elevadas velocidades de avanço	41
4.1.3 Comparação entre parâmetros recomendados e elevadas velocidades de avanço.....	42
4.2 Rebarba do furo.....	44
4.3 Diâmetro do furo	47
4.4 Tipo de Apara	49

4.5 Otimização	50
4.5.1 Comparação dos processos	52
5 Conclusões e trabalhos futuros.....	55
Anexos	61
Anexo A.1 – Resultados da Rugosidade	61
Anexo A.2 – Resultados do Diâmetro e Rebarba	62
Anexo A.3 – Correlações.....	63

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Formação de Apra na furação do Alumínio.....	2
Figura 1.2 – Rebites na estrutura de um avião	3
Figura 2.1 – Estrutura CFC (cúbica de faces centradas).....	7
Figura 2.2 – HSM e MQL.....	9
Figura 2.3 – Rebarba formada num Furo.....	11
Figura 2.4 – Método primitivo de usar um arco para fazer fogo e consequente furo.....	12
Figura 2.5 – Características de uma Broca.....	13
Figura 2.6 – Adesão de material na ferramenta.....	17
Figura 3.1 – CNC MIKRON VCE 5000.....	27
Figura 3.2 – Broca R846-0500-30-A1A.....	28
Figura 3.3 – Varão e Provete de Alumínio.....	29
Figura 3.4 – Provete após Furação.....	30
Figura 3.5 – Bucha e provete com calço de nylon.....	30
Figura 3.6 – Início do ciclo de furação.....	32
Figura 3.7 – Rugosímetro Hommel Tester T1000.....	33
Figura 3.8 – Microscópio Ótico Mitutoyo® TM – 500.....	34
Figura 3.9 – Amostra de Furo, via microscópio.....	34
Figura 4.1 – Rugosidade superficial em função da velocidade de corte e de avanço (Parâmetros recomendados).....	39
Figura 4.2 – Leitura da Rugosidade.....	40
Figura 4.3 – Rugosidade superficial em função da velocidade de corte e de avanço (Avanços elevados).....	41
Figura 4.4 – Comparação Rugosidade superficial (Ra) em função da velocidade de corte e de avanço.....	42
Figura 4.5 - Comparação Rugosidade superficial (Rt) em função da velocidade de corte e de avanço.....	43
Figura 4.6 - Comparação Rugosidade superficial (Rz) em função da velocidade de corte e de avanço.....	44
Figura 4.7- Representação da formação da rebarba.....	45
Figura 4.8 – Rebarba em função dos parâmetros selecionados.	46
Figura 4.9 – Diâmetro em função dos parâmetros selecionados.....	48
Figura 4.10 – Diâmetro de furo realizado com mandril.....	48
Figura 4.11 – Apra em função de velocidade de corte e velocidade de avanço.....	49
Figura 4.12 – Apra em função de velocidade de corte e velocidade de avanço.....	50
Figura 4.13 – Comparação das correlações para convencional e elevado avanço.....	53
Figura 4.14 – Comparação das condições ótimas.....	54

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Séries Alumínio segundo a designação Aluminum Association.....	6
Tabela 2.2 - Geometria de corte em função do material a maquinar.....	13
Tabela 2.3 - Parâmetros processuais (V_c e a) recomendados para brocas de carbonetos sinterizados (3 – 6 mm).....	14
Tabela 2.4 - Valores da velocidade de avanço em função do diâmetro da broca.....	15
Tabela 2.5 – Estudos na Furação do Alumínio.....	22
Tabela 3.1 - Composição Química do Alumínio 2011.....	26
Tabela 3.2 – Propriedades Térmicas do Alumínio 2011.....	26
Tabela 3.3 – Propriedades Mecânicas do Alumínio 2011.....	27
Tabela 3.4 – Características Ferramenta.....	28
Tabela 3.5 – Propriedades Lubrificante.....	29
Tabela 3.6 – Parâmetros Processuais segundo o recomendado.....	31
Tabela 3.7 – Parâmetros Processuais para velocidades de avanço elevadas.....	32
Tabela 3.8 - Design of experiments para AA2011.....	35
Tabela 4.1 - ANOVA Segundo os parâmetros recomendados.....	51
Tabela 4.2 - Correlações segundo os parâmetros recomendados pelo fabricante.....	51
Tabela 4.3 – ANOVA para avanços elevados.....	52
Tabela 4.4 - Correlações para os avanços elevados.....	52
Tabela 4.5 - Condições ótimas.....	54
Tabela A.1 – Resultados da Rugosidade segundo os parâmetros recomendados	61
Tabela A.2 – Resultados da Rugosidade para avanços elevados.....	61
Tabela A.3 – Resultados do diâmetro e Rebarba segundo os parâmetros recomendados	62
Tabela A.4 – Resultados do diâmetro e Rebarba para avanços elevados	62
Tabela A.5 – Correlações para ensaios segundo os parâmetros recomendados.....	63
Tabela A.6 – Correlações para ensaios em avanços elevados.....	64

Nomenclatura

Acrónimos

CFC Cúbica de Faces Centradas

DLC Diamond Like Carbon

DOE Design of Experiments

HSS High Speed Steel

LSM Least Square Method

MQL Minimum Quantity Lubrication

PCD Polycrystalline Diamond

Símbolos

α Ângulo de saída da broca

β Ângulo de hélice

Ψ Ângulo de gume transversal da broca

φ Diâmetro da broca

σ Ângulo de ponta da broca

Abreviaturas

Va Velocidade de avanço

Vc Velocidade de Corte

Vrot Velocidade de rotação

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Os materiais metálicos desempenham um papel de grande relevo nas aplicações industriais. As ligas de Alumínio estão entre os materiais metálicos mais utilizados em operações de maquinagem [Trent, 1977].

O Alumínio é um elemento químico cujo nome no latim é ‘alumen’ ou ‘alum’ (símbolo Al), com número atômico 13. É um elemento que resulta da síntese química da bauxite. É o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, depois do oxigénio (46.60%) e do silício (22.72%), ocupando 8% da mesma [Gautam, et al, 2016].

O Alumínio é usado em muitas indústrias para fazer diferentes produtos, por isso mesmo o seu impacto é significativo na economia global. Componentes estruturais feitos de alumínio, ou das suas ligas, são vitais em indústrias como a aeroespacial e em muitas outras áreas como transportes, construções ... onde a durabilidade, resistência e leveza são esperadas. O processo de furação é amplamente usado na indústria aeroespacial, automóvel e de aviação. Muito embora métodos de corte mais modernos tenham sido desenvolvidos, incluindo maquinagem por eletroerosão, maquinagem por ultrasons, corte por laser e jato de água...a furação convencional continua a ser muito comum [Kurt, et al, 2008].

A furação é um método muito utilizado pela sua simplicidade, rapidez e baixo custo. No entanto é um dos processos de corte mais complexo. Uma das principais características que o distingue dos restantes processos é o facto de combinar o corte com a extrusão da apara (Figura 1.1) [Rivero, *et al*, 2006].

Dentre os variados processos de maquinagem, a furação é normalmente considerada um processo complementar. No entanto, a maquinagem de um componente padrão, por norma divide-se em: furação (30%), torneamento (20%), fresagem (16%), roscagem (15%) e outras (19%). Isto demonstra a relevância da furação [Jimenez, *et al*, 2001].

Na indústria da aviação a furação é muito comum e é aplicada nas diferentes fases da construção de um avião. A furação é especialmente predominante na aplicação dos rebites (Figura 1.2). É através deste método de ligação que a grande maioria dos componentes, pertencentes à estrutura de um avião, são unidos entre si. Para garantir esta ligação, ambas as peças têm de ser furadas, posteriormente é necessário limpar a rebarba formada, só então são alinhadas para guiarem a entrada do rebite. Daí que esta indústria esteja à procura de ganhos na produtividade e simplificação no processo de furação. Para tal é necessário reduzir os tempos de processamento, minimizar ou até mesmo eliminar a ação de lubrificantes e evitar a necessidade de limpar a rebarba formada. Estes requisitos, bem como fatores económicos e ecológicos promoveram o interesse pela maquinagem a seco. Em anos recentes os lubrificantes têm sido vistos como elementos indesejáveis [Klocke e Eisenblätter, 1997].



Figura 1.1 – Formação de apara na furação do Alumínio¹.

¹ Disponível em: <http://www.shutterstock.com/video/clip-2067077-stock-footage-closeup-of-machine-drilling-aluminum-parts.html>

A utilização de materiais com densidade reduzida (caso das ligas de alumínio) é uma forma eficaz de minimizar o peso efetivo das estruturas [Konig, Erinski, 1983].

O constante interesse das indústrias em minimizar o peso efetivo dos seus componentes tem aliciado a busca de novos conhecimentos, em ligas de alumínio. Em especial a liga 2011 apresenta variadíssimas aplicações, tais como: peças de elevada repetição, guarnição automóvel, parafusos, porcas e componentes de embelezamento [Aalco, 2015]. É neste contexto que se considera pertinente o estudo da furação no Alumínio 2011.



Figura 1.2 – Rebites na estrutura de um avião².

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é analisar a furação do Alumínio AA2011 tendo em consideração a qualidade do furo obtido, nomeadamente:

- Perceber a influência de parâmetros processuais, tais como a velocidade de corte (V_c) e a velocidade de avanço (V_a), na qualidade dos furos.
- Estudar a diferença entre a furação a seco e com lubrificação abundante.
- Compreender os efeitos de elevadas velocidades de avanço, uma vez que estas permitem taxas de produção mais elevadas. Importa ainda comparar os resultados obtidos em elevados avanços relativamente aos parâmetros recomendados pelo fabricante das ferramentas.

² Disponível em: <http://www.peteradamsphoto.com/metal-wing/>

- Analisar o processo de formação de rebarba e perceber a sua influência no acabamento final do furo.
- Analisar a variação da precisão dimensional (diâmetro) e a formação de apara.
- Otimizar os parâmetros processuais em função da qualidade do furo, utilizando técnicas estatísticas.

1.3 Conteúdo

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos que incluem a *Introdução*, na qual é descrito o enquadramento, bem como os objetivos propostos.

No *Capítulo 2 – (A Furação das ligas de Alumínio)* são explanados os aspetos inerentes à furação do alumínio, tipo e geometria de ferramentas e parâmetros processuais. É também exposto o fruto da pesquisa realizada pelas diferentes fontes bibliográficas e artigos científicos sobre a furação do Alumínio, permitindo assim perceber o que já foi desenvolvido, bem como nortear o trabalho experimental.

No *Capítulo 3 – (Metodologia Experimental)* é descrita a metodologia utilizada na realização dos ensaios, sendo detalhados o tipo de material, ferramentas e equipamentos usados.

No *Capítulo 4 – (Resultados e a sua discussão)* é feita a análise e discussão dos diversos resultados obtidos em função dos objetivos traçados. É avaliada a furação do alumínio ao nível do processo de corte (velocidades de corte e avanço), da qualidade de superfície obtida (formação de rebarba e rugosidade), precisão dimensional (diâmetro dos furos) e formação de apara.

No *Capítulo 5 – (Conclusões e trabalhos futuros)* são apresentadas, de um modo geral, as diferentes conclusões obtidas. São também descritas as perspetivas de desenvolvimentos futuros nesta temática.

Capítulo 2

A Furação das ligas de Alumínio

- Estado da arte

2.1 Material de excelência

As ligas de Alumínio são os metais metálicos não-ferrosos mais utilizados na indústria. Possuem uma densidade reduzida (cerca de 2.7 g/cm^3), uma ductilidade elevada, uma boa resistência à corrosão e um custo relativamente baixo. A resistência à corrosão das ligas de Alumínio explica-se através da formação de uma película superficial compacta de alumina (Al_2O_3) que protege o material dos agentes corrosivos. O alumínio apenas começou a ser utilizado industrialmente a partir da segunda metade do século XIX. De facto, o alumínio era um metal totalmente desconhecido até 1825, ano em que Oersted procedeu, com sucesso, à síntese química do alumínio a partir do minério de bauxite [Rodrigues e Martins, 2010].

As ligas de Alumínio são identificadas através de quatro algarismos (*Designação Aluminum Association*) e classificadas de acordo com o elemento de liga que se encontra presente em maior quantidade (Tabela 2.1)

Tabela 2.1 – Séries Alumínio segundo a designação *Aluminum Association*.

Série (Designação Aluminum Association)	Tipo de Ligas de Alumínio
1000	Teor em alumínio superior a 99.0%
2000	Ligas alumínio-cobre
3000	Ligas alumínio-manganês
4000	Lidas alumínio-silício
5000	Ligas alumínio-magnésio
6000	Ligas alumínio-magnésio-silício
7000	Ligas alumínio-zinco
8000	Ligas alumínio-outros elementos
9000	Série livre

A Série 1000 apresenta 99% ou mais de alumínio na sua composição química, o que lhe confere uma excelente resistência à corrosão, boa maquinabilidade e boa condutividade elétrica. A utilização estrutural destas ligas é limitada, devido à baixa resistência mecânica do alumínio puro. Na Série 2000 o elemento de liga é o cobre. Devido ao tratamento térmico têm uma elevada resistência mecânica, no entanto a sua resistência à corrosão é menor quando comparadas às ligas da série 1000. As ligas da Série 3000 não são tratadas termicamente, utilizam o manganês para obter moderada resistência e boa maquinabilidade. As ligas 3003, 3004 e 3015 são usualmente utilizadas como chapas de construção. Na Série 4000 o silício diminui o ponto de fusão das ligas, desta série, tornando-as viáveis para soldaduras. Na Série 5000 a utilização do magnésio conduz a uma elevada resistência em aplicações soldadas ou não soldadas. As ligas desta série não são tratadas termicamente, podendo ser usadas em painéis ou perfis de alumínio na construção de estruturas soldadas. A Série 6000 usa o magnésio e o silício combinados de modo a obter maior resistência mecânica e elevada resistência à corrosão. Estas ligas são tratáveis termicamente, sendo as ligas 6061, 6063 e 6351 de grande aplicação estrutural. Na Série 7000 o zinco é o elemento com maior concentração, produzindo um aumento da resistência mecânica quando a liga é tratada termicamente. Estas ligas são geralmente mais resistentes que as ligas da série 6000, porém não têm tanta resistência à corrosão. São geralmente especificadas para a construção de aviões [*Aluminum Association, 1993*].

Foi a partir da descoberta do endurecimento por precipitação, da qual resultaram os primeiros duralumínios, que se começou a utilizar este material em componentes

estruturais, já que o alumínio puro possui uma resistência mecânica reduzida. O endurecimento por precipitação pode ocorrer de forma natural (envelhecimento natural), através da permanência do material à temperatura ambiente, ou de forma artificial (envelhecimento artificial), através do aquecimento e permanência do material, por algum tempo, a temperaturas que habitualmente se situam entre os 150 °C e os 200 °C. O envelhecimento natural pode levar entre vários dias a vários anos até estar concluído, estando a taxa de envelhecimento muito dependente da série e da liga de alumínio [Rodrigues e Martins 2010].

A deformação plástica dos materiais metálicos processa-se ao nível microscópico através de deslocamentos atômicos segundo planos e direções cristalográficas bem determinados e que são habitualmente designados por sistemas de escorregamento. Os planos e direções de escorregamento são os mais compactos no interior da estrutura cristalina. Como a estrutura CFC (cúbica de faces centradas, Figura 2.1) é a estrutura cristalina de máxima compacidade que possui sistemas de escorregamento ativos, pode concluir-se que os metais que possuem este tipo de estrutura (caso do Alumínio) devem ser aqueles que apresentam maior deformabilidade a frio [Rodrigues e Martins, 2010].

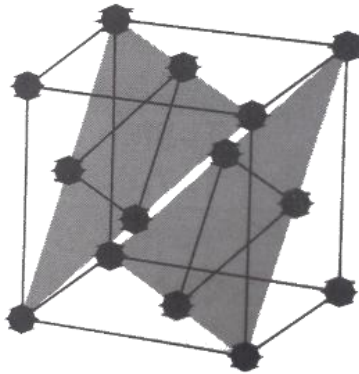


Figura 2.1 – Estrutura CFC (cúbica de faces centradas) ³.

³ 'Tecnologia Mecânica – Tecnologia da Deformação Plástica', Rodrigues e Martins, 2010.

A utilização de materiais com densidade reduzida é uma forma eficaz de minimizar o peso efetivo das estruturas. As ligas de alumínio estão entre os materiais metálicos leves, mais vulgarmente utilizados porque oferecem um número de diferentes propriedades mecânicas e térmicas interessantes [Koning e Erinski, 1983].

Além disso, são relativamente fáceis de serem ‘trabalhados’, especialmente em processos de remoção de material, tais como a maquinagem. De facto, as ligas de alumínio, como uma classe, são consideradas como a família de materiais que apresentam os níveis de maquinabilidade mais elevados, em comparação com outras famílias de metais leves, tais como, as ligas de titânio e as de magnésio [Koning e Erinski, 1983].

A maquinabilidade quantifica o desempenho ou aptidão para a maquinagem, e pode ser definida por vários critérios, tais como a vida útil da ferramenta, acabamento superficial, taxa de remoção de material e energia da máquina-ferramenta. Tem-se comprovado que a composição química, os defeitos estruturais e os elementos da liga influenciam significativamente a sua maquinabilidade [Koning e Erinski, 1983].

A maquinagem de materiais de baixa densidade tem aplicações de grande diversidade, em quase todas as indústrias, especialmente na aeroespacial, automóvel e eletrónica, o que tem atraído o constante interesse de fabricantes, *designers* e investigadores [Stone, et al., 2013; Zitoun e Krishnaraj, 2012].

2.2 Métodos e Processos de Maquinagem aplicados no Alumínio

Técnicas avançadas têm emergido da maquinagem convencional do Alumínio. Salientam-se, dentre os principais processos de corte avançados, a maquinagem de alta velocidade, com quantidade mínima de lubrificação (MQL) e maquinagem a seco.

Maquinagem de alta velocidade (*High speed machining (HSM)*, Figura 2.2) é um termo difícil de definir, isto por variar em alguns fatores, a saber: operação de corte, material a ser trabalhado, a estabilidade do processo (‘vibrações’) e força de corte. De um ponto de vista histórico, a ideia da maquinagem de alta velocidade originou-se a partir da teoria de Salomon, patenteada em 1931 na Alemanha. Prevvia-se que a uma determinada velocidade de corte, 5-10 vezes maior do que na maquinagem convencional, a temperatura na remoção de apra diminuiria (apara/ interface da ferramenta). Este processo permite um aumento na taxa de remoção de material e uma melhoria no acabamento superficial.

Verifica-se também um decréscimo na quantidade de calor gerado na zona de corte. Como resultado, paredes finas podem ser maquinadas com elevada precisão [Grzesik, 2008].

Maquinagem a seco e quase seco (Quantidade mínima de lubrificação MQL, Figura 2.2) foram desenvolvidas como uma alternativa à refrigeração interna de alta pressão, com o objetivo de reduzir o consumo de fluidos de lubrificação. Na maquinagem a seco, o ar comprimido é introduzido na zona de corte, enquanto na MQL, quantidades ínfimas de lubrificante chegam à zona de corte. Ambas as técnicas foram implementadas com o objetivo de reduzir a utilização tradicional de refrigerantes e lubrificantes [Ekinović, *et al*, 2007].

Estas técnicas são o resultado da procura na maximização das taxas de remoção de metal, minimização dos tempos de ciclo e redução do consumo energético das máquinas. Como consequência, têm impulsionado as velocidades de corte, reduzido o tempo de configuração e permitido processos mais simplificados (combinando operações de desbaste e acabamento numa única passagem). Estes desenvolvimentos tiveram um impacto particular na indústria aeroespacial, onde as exigências são cada vez maiores [Benes, 2008].

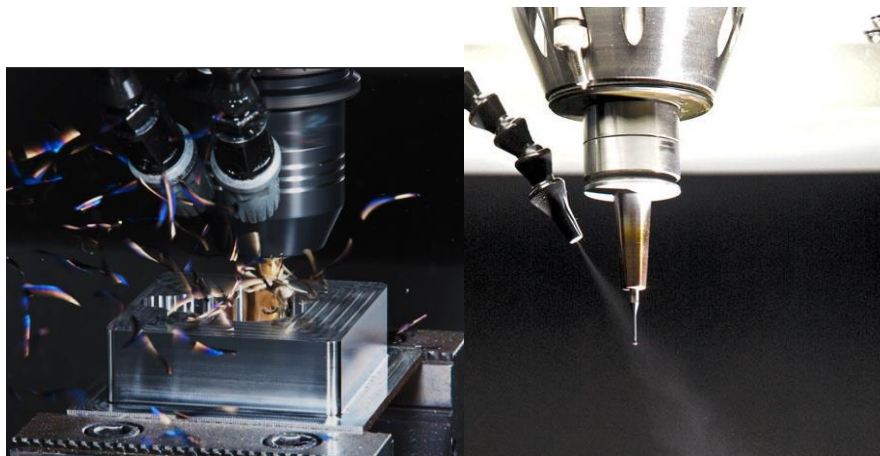


Figura 2.2 – HSM e MQL.⁴

⁴Disponível em: <http://blog.hurco.com/blog/bid/214906/High-Speed-Machining-it-s-more-than-just-a-faster-spindle> e <http://www.creat.com/video/educational-videos/getting-started-with-mql>

2.3 Estudo da Furação no Alumínio

Os processos de corte são operações que removem os excessos de material da peça inicial, de modo a que a forma resultante adquira a geometria desejada. Um dos principais processos de corte é o de arranque de apara (maquinagem) [Rodrigues e Martins, 2010].

A furação é uma das operações de maquinagem mais importante e, vastamente, utilizada pelas diversas indústrias. Numa simples análise dos diversos componentes mecânicos atuais verifica-se que a maioria necessita de furos [Kalpakjian, 1995]. Por exemplo, na estrutura da fuselagem de um avião, milhões de furos são necessários para garantir elementos de ligação [Richardson, 1987]. Os elementos de ligação mais comuns são os rebites. Num avião de tamanho médio existem aproximadamente 85 000 rebites, só nas asas 15 000 deles [Rivero, et al, 2006].

Os processos de furação, normalmente decorrem numa fase final da produção, antecedendo a montagem final. É necessária uma atenção redobrada para eventuais possibilidades de falhas de serviço, relacionadas com cedência e fadiga. Por forma a minimizar tais consequências, deve-se escolher a menor força de avanço possível [Rajmohan et al, 2013].

As duas principais razões do Alumínio ser tão usado na indústria deve-se à sua baixa densidade e boa maquinabilidade. A ductilidade é uma propriedade que o caracteriza e permite que facilmente se atinja a sua deformação plástica, o que também resulta na formação de rebarbas de grandes dimensões [Kundua et al, 2014].

A rebarba consequente da furação é um problema significativo na produção de diversos componentes, sendo mesmo um dos maiores para elementos de elevada precisão. A rebarba é o material removido que sofreu deformação plástica e pode ficar aderido na extremidade do furo (Figura 2.3). A consequência da formação de rebarba é uma diminuição da qualidade final da peça e uma dificuldade acrescida aquando da montagem [Kundua et al, 2014].

A formação de rebarba pode causar variados problemas, incluindo problemas funcionais, pequenos acidentes nos operadores que realizam a montagem, etc., sendo necessários processos adicionais para a remoção da mesma. Por norma, a rebarba adquire propriedades diferentes da peça inicial, uma vez que sofre deformação plástica. Os custos associados à remoção de aparas e rebarbas chegam a atingir valores de 30%, dos custos de maquinagem, para componentes de elevada precisão [Dornfeld e Min, 2010].

Por forma a avaliar a qualidade do componente final, o acabamento superficial é um parâmetro importantíssimo. A rugosidade é muitas vezes usada como ‘meio’ de determinar o acabamento superficial num processo de maquinagem [Ali *et al*, 2011].



Figura 2.3 – Rebarba formada num furo⁵.

⁵ Disponível em: <http://connect.sme.org/dayton18/blogs/david-davidson/2014/02/24/compiled-problems-caused-by-burrs-and-sharp-edges-aerospace-industry>.

2.3.1 Ferramentas e Geometria de Corte

Provavelmente um dos primeiros mecanismos desenvolvidos na pré-história foi o de fazer furos. A corda de um arco era presa à volta de uma seta que rapidamente era rodada (como resultado, não só se obtinha fogo, mas também um furo na madeira) (Figura 2.4). Muito embora as técnicas de furação de hoje sejam muito diferentes, o princípio de uma ferramenta rodar para fazer um furo é o mesmo utilizado nas furadoras mais avançadas [Krar e Check, 1997].

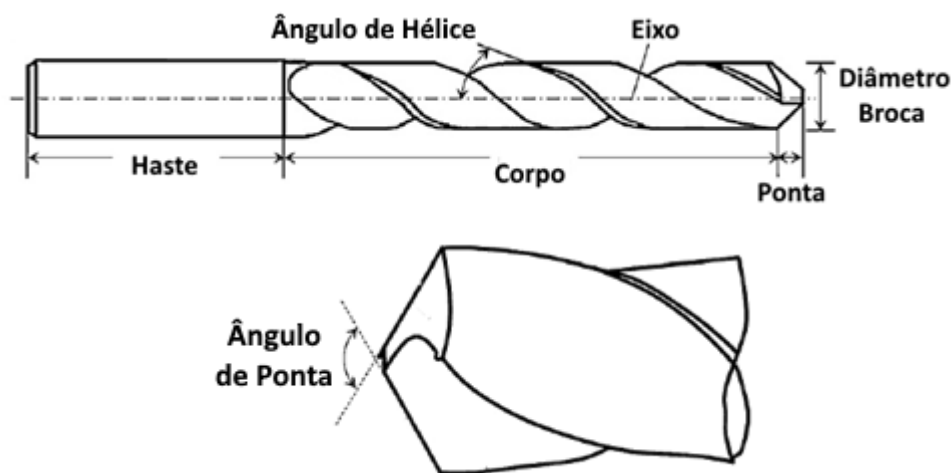


Figura 2.4 – Método primitivo de usar um arco para fazer fogo e consequente furo⁶.

Existem duas partes principais numa broca: a haste e o corpo (Figura 2.5). A haste permite o encaixe ou acoplação com a máquina. O corpo é desenhado para garantir uma ação de corte eficiente [Olivo, 1987].

A ação do corte de uma broca resulta em muito do “design” da sua ponta. O ângulo da ponta depende do material que se pretende furar, do tamanho do furo e da natureza da operação. As condições de corte também variam para diferentes materiais. Por norma, os parâmetros alterados na broca são o ângulo e forma da aresta de corte. O ângulo de ponta “Standard” da aresta de corte, para operações vulgares, é de 118° [Olivo, 1987].

⁶ ‘Technology of Machine Tools’, Krar e Check, 1997;

Figura 2.5 – Características de uma Broca⁷.

Uma vez que para diferentes materiais são recomendadas diferentes geometrias de corte, é necessário levar isso em consideração. Os ângulos de corte apresentados na Tabela 2.2 foram desenvolvidos para garantir furos de precisão, minimizando as forças de corte, avanço, e otimizar a vida útil da ferramenta [Kalpakjian, 1995; Stephenson and Agapiou, 1997].

Tabela 2.2 - Geometria de corte em função do material a maquinar.

Material	Ângulo de Ponta (σ) [°]	Ângulo de Hélice (β) [°]	Ângulo de Saída (α) [°]	Ângulo de Gume Transversal (Ψ) [°]
Aços	118 - 124	24 - 32	10 - 15	125 - 135
Aços inoxidáveis	118 - 135	24 - 32	7 - 10	120 - 130
Ferros fundidos	118	24 - 32	8 - 12	125 - 135
Ligas de Alumínio	90 - 118	24 - 48	12 - 15	125 - 135
Ligas de Magnésio	70 - 118	30 - 45	12 - 15	120 - 135
Cobre	118	10 - 30	12 - 15	125 - 135
Plásticos	60 - 90	29 - 40	7	120 - 135

⁷ Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/51534921_fig1_Fig-1-Drill-bit-geometry-a-twist-drill-bit-and-b-drill-bit-tip

2.3.2 Parâmetros Processuais

Muito embora a velocidade de furação do alumínio tenha vindo a aumentar ao longo dos anos, ainda aparenta existir uma margem para crescimento. Realizar furações utilizando a cadência convencional, muitas vezes resulta numa produtividade maior, evitando um uso excessivo das capacidades das ferramentas [Hamade e Ismail, 2005].

O alumínio é normalmente maquinado com ferramentas em aço rápido (HSS – *High Speed Steel*), diamante e carbonetos. Ferramentas em cerâmica, baseadas em nitreto de silício, geralmente não são usadas em alumínio devido à elevada solubilidade do silício no alumínio [Kelly e Cotterell, 2002]. Ainda que o aço rápido continue a ser a principal escolha na furação do alumínio em velocidades convencionais, para velocidades médias/ elevadas a tendência recai nas ferramentas de carbonetos [List, et al., 2005].

É possível comprovar nas tabelas seguintes:

- A velocidade de corte e avanço recomendadas para brocas de carbonetos sinterizados (Tabela 2.3) [Sandvik Portugal];
- Valores da velocidade de avanço em função do diâmetro da broca (Tabela 2.4) [Sandvik Portugal].

Tabela 2.3 - Parâmetros processuais (V_c e a) recomendados para brocas de carbonetos sinterizados (3 – 6 mm).

Material	Velocidade de Corte [m/min]	Avanço [mm/rot]
Aço alto-carbono	70 - 120	0,10 - 0,25
Aços inoxidáveis	40 - 80	0,08 - 0,14
Ligas de titânio	20 - 60	0,06 - 0,12
Ferros fundidos	70 - 130	0,15 - 0,25
Aços extra-duros	30 - 50	0,06 - 0,10
Ligas de alumínio	120 - 230	0,15 - 0,25
Cobre	90 - 150	0,15 - 0,25

Tabela 2.4 - Valores da velocidade de avanço em função do diâmetro da broca.

Diâmetro da Broca [mm]	Avanço [mm/rot]
3 - 6	0,15 - 0,25
6 - 10	0,20 - 0,40
10 - 14	0,30 - 0,50
14 - 20	0,40 - 0,60

Os parâmetros processuais, em qualquer maquinagem, englobam grandezas como a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a profundidade de corte. A velocidade de corte e de avanço são selecionados tendo em vista a qualidade do material da broca, o material a furar, o diâmetro da broca e a rigidez do equipamento (tipo de suporte). É esperado que se obtenha melhor resultado utilizando elevadas velocidades de corte e baixos avanços, visto que a utilização de avanços elevados pode conduzir à fratura da broca [Alting, 1994; Boothroyd e Knight, 1989; Groover, 1996].

Na operação de furação é usual empregar-se a velocidade de rotação (n), sendo esta expressa em rotações por minutos [rpm] e determinada através da seguinte expressão:

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad (1.1)$$

Sendo, V_c a velocidade de corte em [m/min] e D o diâmetro da broca em [mm].

De acordo com o 'Manual dos Metais' (*Metals Handbook (ASM Intl)*) muitas das dificuldades encontradas aquando da maquinação do alumínio, nomeadamente a formação de apara e mau acabamento da superfície, podem ser eliminadas por aumentar a velocidade de corte. Em determinadas aplicações, velocidades de 35-50 m/s são utilizadas para obter superfícies com rugosidade reduzida [ASM International Handbook Committee, 1990].

Brocas “standard” são geralmente satisfatórias na furação em ligas de alumínio, mas para furos de elevada profundidade são recomendadas brocas de hélice elevada com ângulos a variar entre os 40°-48°, em vez dos 24°-28°. Com um ângulo de hélice mais elevado, aumenta-se também o ângulo de inclinação. Produz-se assim uma apara mais fina, sendo esta mais facilmente expelida [Kelly e Cotterell, 2002].

2.3.3 Furação a Seco vs Lubrificada

Desde o começo dos anos 90 que imensos esforços têm sido feitos para suplantar os desafios impostos pela maquinagem a seco [Klocke e Eisenblatter, 1997].

O desafio da manufatura sustentada iniciou quando as empresas começaram a deparar-se com desafios inerentes aos custos na reciclagem e na garantia de ambientes de trabalho mais saudáveis e seguros. A eliminação dos fluidos de corte passa, em muito, pela concretização deste princípio [Byrne, e Scholta, 1993].

Na furação a seco a ferramenta tem de suportar condições extremas de trabalho, que incluem temperaturas elevadas e grandes níveis de atrito. Isto requer que a ferramenta possua elevada dureza e um baixo coeficiente de atrito [Tonshoff, et al., 1994].

Várias investigações têm mostrado que o desgaste associado à ferramenta está, em muito, relacionado com processos abrasivos, especialmente condições de velocidade mais reduzidas. Para velocidades superiores, a temperatura atingida na face de ataque da ferramenta aumenta consideravelmente. Esta mesma temperatura pode escalar substancialmente, caso não sejam usados lubrificantes (maquinagem a seco). Isto acontece devido a um importante processo de deformação, consequente da concentração de tensões e efeitos de atrito na interface ferramenta – apara [Moufki et al., 1998].

Nos processos de deformação é notório o efeito da difusão. O material removido é ‘arrastado’ ao longo da superfície de contacto da ferramenta, conduzindo a processos de adesão (Figura 2.6). Estes, por sua vez, induzem à formação de crateras na face de ataque da ferramenta. Consequentemente, reduzem o tempo de vida da mesma [Nouari et al., 2005].

Os fluidos de corte providenciam três efeitos positivos: a remoção do calor gerado, lubrificação entre a apara e a ferramenta e a evacuação das aparas. Na furação a seco, se o lubrificante é eliminado, o processo tem de ser repensado para colmatar a abstenção do fluido de corte. As principais dificuldades na furação a seco têm que ver

com o rápido desgaste na ferramenta, causado pela adesão de material e pela formação de grandes aparas [Rivero *et al*, 2006].

A utilização dos fluidos de corte permite reduzir o desgaste na ferramenta e a melhoria do acabamento da superfície. Têm como consequência ajudar na preservação dos equipamentos, pois protegem-nos da corrosão. Além disso, minimizam as forças de corte e providenciam uma poupança no consumo energético. No entanto, estas vantagens são acompanhadas de várias desvantagens. Por vezes os fluidos de corte custam mais do dobro dos custos associados às ferramentas. A maioria destes fluidos são nocivos aos operadores das máquinas e a sua reciclagem é desafiante [Astakhov, 2008].

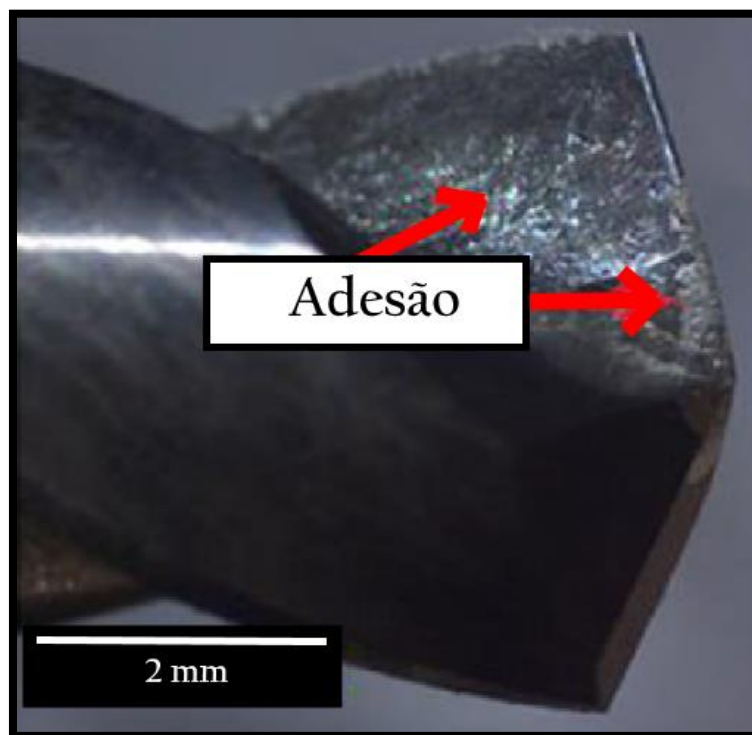


Figura 2.6 – Adesão de material na ferramenta⁸.

⁸ 'Assessment of cutting forces and hole quality in drilling Al2024 aluminium alloy: experimental and finite element study', Giasin, et al., 2016

2.3.4 Otimizações no Processo de Furação

A otimização dos parâmetros de corte é a chave para solucionar muitos problemas associados à maquinagem [Jain, 2000]. A complexidade, inerente aos processos de corte, tornam estes problemas ‘multifacetados’ [Yih-Fong e Fu-Chen, 2006].

Na ‘prática’, numa oficina convencional, os parâmetros de corte são selecionados a partir de literatura especializada, o que nem sempre resulta em produtos ótimos [Derehi, *et al*, 2001].

Na perspetiva de uma otimização do processo de corte, o conhecimento referente ao desgaste na ferramenta é essencial. Na furação a seco, falhas associadas à ferramenta são um fator preponderante condicionando a produtividade e eficiência na maquinagem. Por isso mesmo, um dos maiores objetivos na investigação dos processos de corte tem que ver com o comportamento da ferramenta e o seu tempo de vida [Nouari, *et al.*, 2005].

Como resultado, os principais focos de pesquisa centram-se na otimização dos parâmetros de corte, na melhoria das condições de trabalho e na geometria associada às ferramentas de corte [Trent, *et al*, 2000].

A otimização dos parâmetros é normalmente uma tarefa difícil, isto porque é necessária experiência em operações de maquinagem, bem como conhecimento de algoritmos matemáticos. Entre os métodos mais tradicionais incluem-se cálculos para determinação de fórmulas, programação dinâmica, pesquisas aleatórias e métodos de gradiente [Pandey e Pal, 1995]. Métodos mais inovadores usam aproximações Lagrangeanas [Hsu, *et al*, 1995]. Através de alguns destes métodos é possível encontrar uma solução ótima, mas normalmente são lentos ao convergirem, o que resulta num elevado tempo computacional.

A otimização singular é bem diferente de uma otimização com variáveis múltiplas. Numa otimização múltipla há mais do que uma variável ‘em jogo’, pelo que cada uma poderá conduzir a um valor ótimo. Em muitos casos chegam a contrariar-se [Hsu, *et al*, 1995; Srinivas e Kalyanmoy, 1994].

Num processo de fabrico existem diferentes parâmetros, com os devidos ajustes e níveis, pelo que a sua influência é significativa nas características finais do produto. Para otimizar um processo podem-se recorrer à tentativa e erro, com o objetivo de encontrar os melhores parâmetros. No entanto, este método exige elevados testes experimentais o que resulta num grande desperdício de tempo e dinheiro. Foi desenvolvida uma

ferramenta muito importante para garantir rápidos melhoramentos na qualidade, a saber o DOE “*design of experiments*” [Coleman e Montgomery, 1993].

O DOE é uma técnica experimental (aplicação estatística) que possibilita a investigação das melhores combinações dos parâmetros processuais. Permite realizar mudanças nas quantidades/níveis e conjuntá-los por forma a obter resultados estatísticos válidos [Antony, *et al*, 1998].

Este método estatístico é cada vez mais utilizado por diversos investigadores, com o objetivo de obterem otimizações para os seus dados experimentais.

2.3.5 Investigações da Furação no Alumínio

Alguns estudos já foram realizados nesta área, nomeadamente furação nas ligas AA1050, AA2017 e AA6061 utilizando brocas SKH56 sob condições de 1500 rpm e 1.0 mm/rev. Foi possível apurar que a furação no AA1050 é extremamente difícil, enquanto no AA2017 e AA6061 é perfeitamente exequível. Na realidade, a liga AA1050 (praticamente Alumínio puro, composto de 99.50% Al) é convencionalmente classificada como sendo muito dúctil e, conseqüentemente, de baixa maquinabilidade. As ligas AA2017-T6 e AA6061-T6 são ambas obtidas por precipitação endurecida, apresentando característica que favorecem a sua maquinabilidade [Sakurai, *et al*, 2000].

Kurt *et al*, em 2008, realizou uma investigação no processo de furação numa liga de Alumínio AA2024. Foi estudado o efeito resultante da geometria da ferramenta (nomeadamente o revestimento e o ângulo da ponta da ferramenta), bem como a variação dos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) e a qualidade do furo (tamanho do furo, rugosidade e desvio no furo). Foram escolhidas 5 tipos de ferramentas (sem revestimento, com ângulo: 118°; TiN com ângulo: 118°; TiAlN com ângulo: 118°; Co 5% com ângulo: 130°; e TiN com ângulo: 130°), com 10 mm de diâmetro, em HSS (Aço Rápido) usadas para realizar furos de 30 mm de profundidade. As velocidades de corte variaram entre os 30, 45 e 60 m/min e os avanços entre 0.15, 0.20 e 0.25 mm/rev. Os vários ensaios foram realizados sem lubrificação. Os resultados experimentais demonstraram que o desvio no furo devia-se, em muito, às vibrações na furação. Evidenciaram, também, que as brocas em HSS com revestimento de Cobalto 5% apresentam melhores performances, em comparação com as restantes testadas. Concluiu-se também que a melhor qualidade superficial verificava-se próxima do fim do furo [Kurt, *et al*, 2008].

Rivero, et al, em 2006, nos seus estudos, tentou perceber o grau de maquinabilidade, a seco, das ligas de Alumínio, bem como o potencial associado a novos desenvolvimentos em revestimentos e geometrias de ferramentas. Os ensaios foram realizados com brocas, de 10 mm, com 3 arestas de corte, sem revestimento e com revestimento em DLC (Diamond Like Carbon, que é um revestimento em carbono que apresenta propriedades semelhantes ao diamante) e realizou furos com 25 mm de profundidade. Realizou os ensaios num centro de maquinagem horizontal de alta velocidade, numa liga de alumínio frequentemente utilizada em estruturas de aviões, a saber alumínio AA7075-T6. Os principais obstáculos com que se deparou prenderam-se com a grande dificuldade na aceleração da broca, isto devido à adesão do material. As velocidades de corte variaram entre 150-250 m/min e escolheu um avanço fixo de 0.3 mm/rot [Rivero, et al, 2006].

Nouari, et al, em 2005, optou por realizar ensaios de furação, mas utilizou velocidades de corte e avanço muito reduzidos. Segundo as suas conclusões, em velocidades de corte mais baixas os esforços na ferramenta são menores e a temperatura não é tão significativa. Para velocidades mais elevadas começam a notar-se efeitos de adesão. Os ensaios foram realizados sem qualquer lubrificação, numa liga de Alumínio AA2024, com ferramentas em aço rápido e carbonetos de tungsténio. Escolheu como velocidades de corte 25, 65 e 165 m/min e um avanço constante de 0.04 mm/rev. Os furos tinham 8 mm de profundidade e 6 mm de diâmetro. Os melhores resultados foram obtidos com ferramentas de carbonetos de tungsténio [Nouari, et al, 2005].

Kelly e Cotterell, em 2002, estudou os efeitos da lubrificação mínima (MQL) na furação do Alumínio. Os ensaios de furação foram realizados em Alumínio, obtido por fundição, utilizando variados métodos de aplicação do lubrificante e diferentes parâmetros na velocidade de corte e avanço. Utilizou brocas de 10 mm, em aço rápido, para fazer furos de 30 mm de profundidade. Com os seus resultados concluiu que o futuro na furação passará em muito pelo uso da MQL, as quantidades de lubrificante usadas são mínimas, em comparação com as convencionais, não comprometendo o tempo de vida da ferramenta, nem o acabamento final da peça [Kelly e Cotterell, 2002].

Barani, et al, em 2014, investigou o efeito da vibração na furação do Alumínio. Na furação com vibração, vibrações de alta frequência e baixa amplitude são adicionadas na direção do avanço. Nos seus ensaios definiu parâmetros de velocidade de corte (7, 12 e 20 m/min) e avanços (0.104, 0.208 e 0.348 mm/rev) quer para furação convencional, quer furação com adição de vibrações ultrassónicas. No seu trabalho concluiu que o aumento

do avanço conduziu a fenómenos de adesão na ferramenta. Verificou também que o acabamento superficial (Rugosidade) e a formação de aparas melhoram significativamente com o processo de vibrações ultrassónicas, em comparação com os métodos convencionais [Barani, *et al*, 2014].

Elajrami *et al*, em 2013 analisou o efeito dos parâmetros de furação na qualidade dos furos. Nos seus ensaios optou por usar avanços muito reduzidos (0.31 mm/min correspondente a 5.09E-04 mm/rev) e velocidades de corte baixas (11.47, 15.70, 22.29 m/min). Segundo os seus resultados, a qualidade dos furos melhorou para rotações mais elevadas e avanços mais reduzidos. Pôde observar que a maior parte dos furos não são cilíndricos, mas sim cónicos [Elajrami, *et al*, 2013]

Giasin *et al*, em 2016 estudou a influência das forças de corte na furação do alumínio. Realizou os ensaios numa liga aeroespacial (AA2024-T3) e utilizou uma broca de 6 mm revestida com nitreto de alumínio e titânio, sem qualquer lubrificação. Concluiu que os parâmetros de corte têm uma influência enorme na qualidade dos furos. O tamanho e espessura de aparas aumentaram para avanços maiores. O avanço apresentou uma maior influência no tamanho da apara, enquanto a velocidade de rotação afetou mais a espessura da apara. A rugosidade aumentou proporcionalmente com o avanço e velocidade de rotação. A influência do avanço na rugosidade foi maior [Giasin, *et al*, 2016].

Na Tabela 2.5 é possível observar o resumo dos diferentes resultados obtidos nos variados estudos.

2.4 Síntese:

Os estudos consultados foram da maior importância na contextualização do conhecimento já existente nesta área de investigação. A diversidade permitiu obter um espectro maior de conhecimentos que norteiam estudos futuros.

O Alumínio continua a ser um material utilizado em variadíssimas indústrias, em muito pelas propriedades que apresenta, mas também pelas diversas opções disponíveis nas suas diferentes ligas. A série 2000 do Alumínio tem sido alvo de bastante atenção e de estudo por diversos investigadores. Também são salientados dois estudos diferentes, um em alumínio obtido por fundição e um de uma liga 7000. Não foi possível consultar nenhum estudo em específico na liga 2011, muito provavelmente por ainda não estarem disponíveis. Isto tornou ainda mais pertinente o estudo desta liga 2011.

Tabela 2.5 – Estudos na Furação do Alumínio.

Referência	Material Usado	Propriedades da Ferramenta	Vc m/min	Avanço mm/rev	Acabamento Superfície [μm]	T °C	Desvio no Furo [μm]	
Kurt (2009)	Al 2024	10 mm, Hss revestido 5% Co Ângulo de ponta 130° Furação a seco;	30	0,20	3,8		61,28	Furos com 30 mm de profundidade
			45	0,20	4,1		60,85	
			60	0,20	4,7		62,98	
Rivero (2006)	Al 7075-T6	10 mm, Balinit Triton DLC Ângulo de ponta 130° Furação a seco;	150	0,30		253		Furos com 25 mm de profundidade
			200	0,40		251		
			250	0,50		257		
Nouari (2005)	Al 2024	6 mm, Hss revestido com Carbunetos Tungstênio Ângulo de ponta 130° Furação a seco;	165	0,04	1,0-3,0	180	90,00	Depois de 50 furos furos com 8 mm de profundidade
			65	0,04	1,0-3,5	125	120,00	
			25	0,04	1,0-2,0	90	180,00	
Kelly (2002)	ACP5080	10 mm, Hss Com lubrificação mínima;	105	0,15	5,0	25-40	30,00	Furos com 30 mm de profundidade
			25	0,30	2,9	25-40	20,00	
Barani (2014)	Al 2024-T6	5 mm, Hss Furação a Seco; 'Convencional'	7	0,10	5,2			Furos com 20 mm de profundidade
			12	0,10	3,5			
		5 mm, Hss Furação a Seco; 'Vibrações Ultrassônicas'	20	0,10	2,2			
			7	0,10	2,0			
Elajrami (2013)	Al 2024-T3	6 mm, Hss Furação a Seco;	12	0,10	1,9			Furos com 13,5 mm de profundidade
			20	0,10	1,6			
			11	5,09E-04	0,6			
			16	5,09E-04	0,5			
Giasin (2016)	Al 2024-T3	6 mm, Hss revestido com nitrato de alumínio e tinânio Ângulo de ponta 140° Furação a seco;	22	5,09E-04	0,3			Furos com 8 mm de profundidade
			19	0,10	1,4			
			57	0,10	1,3			
			113	0,10	1,7			
			170	0,10	3,0			

Foi possível verificar, pelos diversos resultados, que os parâmetros de Velocidade de Corte e de Avanço têm uma influência muito significativa no acabamento de superfície. Em termos de rugosidade, os melhores resultados apresentam-se para avanços mais reduzidos, combinados com velocidades de corte mais elevadas. No entanto, independentemente da velocidade de rotação, um aumento no avanço, por norma, resultou num aumento da rugosidade. Velocidades de corte superiores resultaram em aumentos na temperatura, bem como de efeitos adesão, enquanto velocidades de corte mais reduzidas conduziram a menos esforços sobre a ferramenta. Aparas maiores e mais espessas foram resultado de elevados avanços e elevadas velocidades de corte.

Por forma a evitar erros sistemáticos, associados a uma seleção errónea dos parâmetros de corte a utilizar, é de todo proveitoso otimizar o processo da furação do alumínio (levando em consideração todas as variáveis pertinentes).

Capítulo 3

Metodologia Experimental

O trabalho experimental iniciou-se com uma seleção e análise dos componentes em estudo. Procedeu-se à escolha do material e das ferramentas a utilizar. Foram pensadas as condições de trabalho e definidas as dimensões e geometria dos provetes. Foi também examinado o posicionamento e aperto associado aos provetes.

Seguidamente, e já numa componente prática, decorreram os ensaios de furação do alumínio. Para os diferentes testes foi usada a mesma ferramenta. Nos primeiros ensaios não foi usado qualquer tipo de lubrificante. As velocidades de corte (V_c) definidas foram de [30, 70, 110] m/min e as velocidades de avanço (V_a) de [0.15, 0.20, 0.25] mm/rot.

Posteriormente e mantendo os valores da velocidade de corte e velocidade de avanço, foi estudado o efeito de um lubrificante.

Nos últimos provetes testados foi possível perceber o efeito de elevadas velocidades de avanço. Esta ação, é de todo pertinente uma vez que se pretende diminuir ao máximo o ‘tempo de furação’ (permitindo cadências maiores). As velocidades de corte (V_c) definidas foram de [30, 50, 70] m/min e as velocidades de avanço (V_a) de [1,0; 1,5; 2,5] mm/rot.

Todos os furos foram criteriosamente analisados, quer por observação recorrendo ao microscópio ótico, quer por apalpação utilizando o rugosímetro.

3.1 Alumínio 2011

A liga de alumínio 2011 é uma liga de alta resistência mecânica, cuja maquinabilidade é excepcionalmente boa. Muitas vezes chamada de liga de maquinagem livre ('FMA' *Free Machining Alloy*) é adequada para usar em tornos automáticos. A maquinagem em altas velocidades produz aparas finas que são facilmente removidas. As excelentes características de processamento permitem a produção de peças complexas e detalhadas. Algumas das aplicações incluem: peças de elevada repetição, guarnição automóvel, parafusos, porcas e componentes de embelezamento [Aalco, 2015].

Passam-se a indicar as características inerentes ao Alumínio 2011:

Tabela 3.1 - Composição Química do Alumínio 2011⁹.

Elemento	Percentagem %
Si (Silício)	≤ 0.40 %
Fe (Ferro)	≤ 0.70 %
Cu (Cobre)	5.0 - 6.0 %
Pb (Chumbo)	0.20 - 0.60 %
Bi (Bismuto)	0.20 - 0.60 %
Zn (Zinco)	≤ 0.30 %
Outros	≤ 0.15 %
Al (Alumínio)	91.2 - 94.6

Tabela 3.2 – Propriedades Térmicas do Alumínio 2011⁹.

Propriedade	Valor
Calor específico	0.880 J/g °C
Condutividade Térmica	170 W/m.K
Temperatura de Fusão	540.6 – 643 °C

⁹ Características do Alumínio 2011 apresentadas no Matweb;

Tabela 3.3 – Propriedades Mecânicas do Alumínio 2011⁹.

Propriedade	Valor
Dureza (Brinell)	97
Dureza (Vickers)	109
Dureza (Rockwell A)	40.4
Tensão de Cedência	270 MPa
Módulo de Young	70.0 GPa
Coefficiente de Poisson	0.33
Extensão após rotura	35 % (a 200°C)
Densidade	2.83 g/cm ³

3.2 Centro de Maquinagem

Para realizar os ensaios de furação recorreu-se ao centro de maquinagem MIKRON VCE 500®, instalado no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (Figura 3.1). Este centro de maquinagem tem capacidade para 20 ferramentas, no seu armazém, uma potência máxima de 11 kW, uma velocidade máxima de rotação da árvore de 7500 rpm e um controlador HASS.



Figura 3.1 – CNC MIKRON VCE 500

3.3 Brocas Helicoidais

No processo experimental apenas foi usado um tipo de broca helicoidal. A broca foi a R846-0500-30-A1A 1220 CoroDrill® Delta-C “solid carbide drill”, revestida com “nitreto de titânio” (Ferramenta 1, “TiN”, 140°, Figura 3.2). A ferramenta pertence à marca “SANDVIK®”.

Para comparar a precisão dimensional foi realizado um ensaio com um mandril e com uma broca helicoidal (4,75 mm diâmetro) ambos da marca ILIX®, em HSS.

Ferramenta (R846-0500-30-A1A 1220 “TiN”, 140°)

A ferramenta possui um ângulo de ponta de 140°, um diâmetro de corte de 5 mm e um comprimento útil de 35 mm. É de carbonetos sinterizados, revestida com “nitreto de titânio”, na Tabela 3.4 estão enunciadas as suas características.



Figura 3.2 – Broca R846-0500-30-A1A.

Tabela 3.4 – Características da ferramenta [Sandvik Portugal].

R846-0500-030-A1A 1220 CoroDrill®		
CZC	Cód. Tamanho Conexão	6
DC	Diâmetro de Corte	5 mm
LU	Comp. Útil	35 mm
OAL	Comp. Total	66 mm
LCF	Comp. do canal p ^a apara	44 mm
PL	Comp. de ponta	0,909926 mm
SIG	Ângulo de Ponta	140°
OHX	Balanço máximo	46 mm
BSG	Grupo básico Standard	DIN 6537 L
TCHA	Tolerância atingível de furo	H9
CNSC	Cód. Entrada de refrigeração	I: entrada axil concêntrica

3.4 Lubrificante

O Lubrificante utilizado nos ensaios com lubrificação foi o rhenus® FU 50 T. Este lubrificante é uma emulsão que apresenta excelentes propriedades, sendo aconselhado para operações exaustivas de maquinagem. É especialmente indicado para a maquinagem do Alumínio. As suas propriedades estão plasmadas na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Propriedades do Lubrificante¹⁰.

Concentrado		Emulsão	
Viscosidade 20 °C (mm ² /s)	Percentagem Óleo Mineral	Valor pH	Proteção da Corrosão (DIN 51360/1)
≈150	≈50%	9,2	2,5%

3.5 Provetes e Sistema de Fixação

Para o estudo da furação do Alumínio AA2011 foi necessário desenvolver provetes. Foi adquirido um varão de Alumínio AA2011 com 25 mm de diâmetro e 700 mm de comprimento (Figura 3.3). Para ser exequível realizar múltiplos ensaios de furação foi necessário seccioná-lo em pequenos discos. Uma vez que era conveniente que o furo fosse passante e, tendo em conta o comprimento útil da broca selecionada, definiu-se uma altura de 10 mm para cada um dos discos.



Figura 3.3 – Varão e provete de Alumínio AA2011.

¹⁰ Disponível em <http://www.pingyiao.com/en/rhenus/rh5/pdf/r.rhenus%20FU%2050%20T.pdf>

A furação nos provetes também sofreu detalhada atenção. Pretendia-se maximizar o aproveitamento de material, daí que tenha sido estudada a possibilidade de realizar mais do que um furo por disco. Foi levado em consideração um espaçamento mínimo aceitável entre os furos, isto para não surgirem interferências/erros associados à formação de rebarba. Chegou-se à conclusão que três furos por disco seria exequível (Figura 3.4). Foi feita uma indentação para assinalar o primeiro furo e os seguintes foram feitos no sentido contrário ao do ponteiro dos relógios.



Figura 3.4 – Provete após furação.

O sistema de aperto e de apoio dos discos também foi alvo de minuciosa análise. Uma vez que era necessário realizar furos passantes, para poder analisar o efeito da rebarba na face de saída e as dimensões de avara, o disco não poderia estar assente numa superfície rígida. Recorreu-se a uma bucha (Figura 3.5) para garantir a fixação do disco à mesa de trabalho, no entanto debaixo do disco foi inserido um calço de nylon.

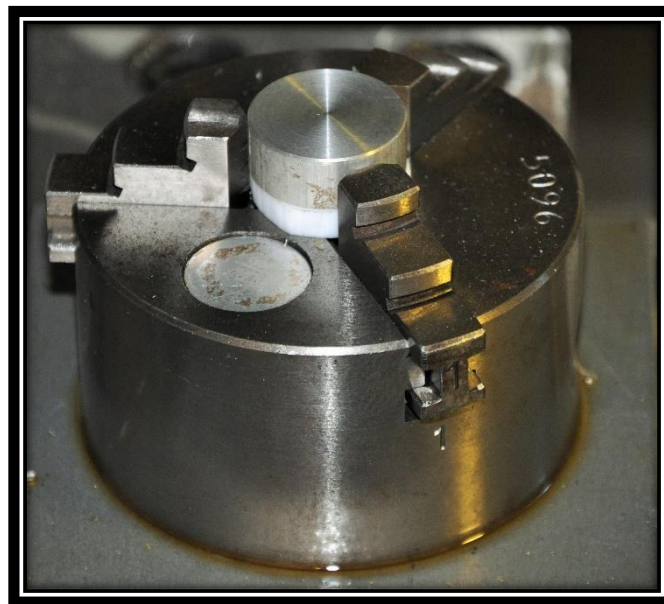


Figura 3.5 – Bucha e provete com calço de nylon.

3.6 Ensaios

3.6.2 Seleção dos Parâmetros Processuais

No processo de furação existem duas principais variáveis a ter em consideração, a saber a velocidade de corte e a velocidade de avanço. Antes de definir estes mesmos parâmetros foram levados em consideração alguns aspetos. Não seria possível realizar ensaios com rotações superiores a 7500 rpm (limitação do equipamento), logo ensaios de maquinagem em alta velocidade (HSM) foram descartados. Também não era pretendido estudar gamas de velocidades de corte e de avanço que fossem desaconselhadas para a ferramenta e material selecionados, conduzindo a resultados inválidos. Daí que tenha sido consultada informação, proveniente do fabricante da ferramenta, que permitiu reduzir o intervalo de possibilidades a adotar. Na tabela 3.6 estão descritos os valores selecionados para velocidades de corte e avanço, segundo os parâmetros recomendados.

Uma vez que ganhos de produtividade são procurados pelas mais variadas indústrias, tornou-se apelativo o estudo de elevadas velocidades de avanço. Isto porque para um mesmo comprimento de furação ('L'), caso seja adotado um avanço maior o tempo de corte reduzirá. Logo o estudo de elevadas velocidades de avanço e os seus efeitos é uma temática importantíssima e alvo de imensa atenção. Na tabela 3.7 encontram-se os valores adotados para velocidades de avanço elevadas.

Tabela 3.6 – Parâmetros Processuais segundo o recomendado.

Vc [m/min]	a [mm/rot]
30	0,15
	0,25
70	0,2
110	0,15
	0,25

Tabela 3.7 – Parâmetros Processuais para velocidades de avanço elevadas.

Vc [m/min]	a [mm/rot]
30	1,0
	1,5
	2,5
50	1,0
70	1,0

3.6.2 Características dos Ensaios

Por forma a minimizar erros e condicionamento de resultados, os parâmetros escolhidos para os furos por cada disco foram aleatórios, ou seja, no mesmo disco foram realizados ensaios diferentes Vc e Va.

Para cada ensaio foi feita uma repetição. Após três furações o ciclo foi reiniciado (Figura 3.6).

Numa fase inicial todos os ensaios foram feitos a seco. Seguiram-se os ensaios com lubrificação e terminou-se com ensaios de avanço elevado.

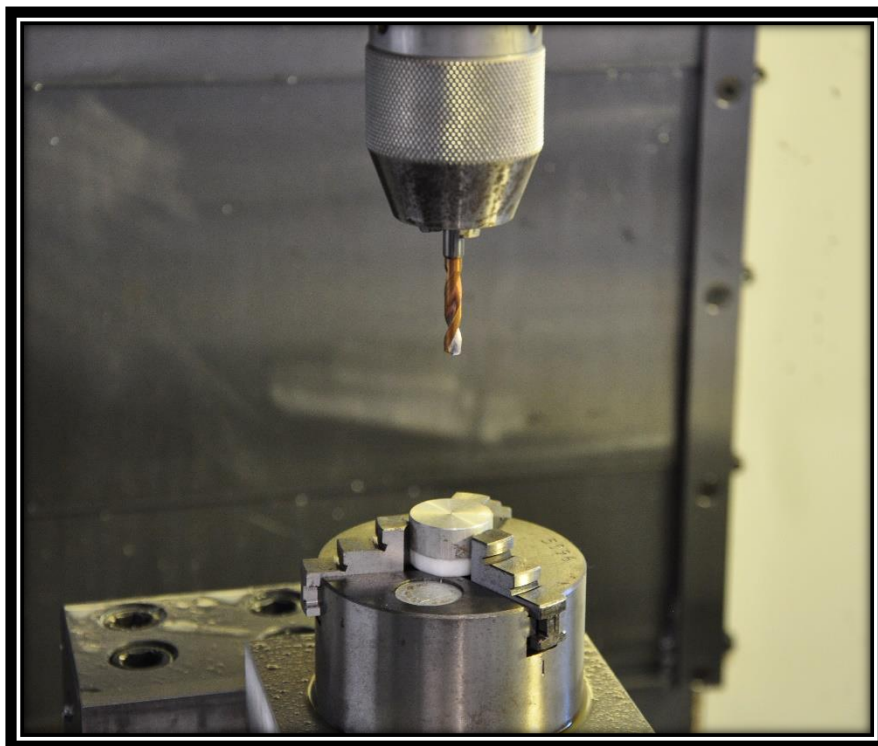


Figura 3.6 – Início do ciclo de furação.

3.7 Análise do Acabamento

3.7.1 Rugosidade

Para determinar a rugosidade, da superfície interna do furo, foi utilizado um rugosímetro eletromecânico (Hommel Tester® T1000, Figura 3.7). Com o objetivo de recolher resultados precisos, foram efetuadas três apalpações por cada furo. Para tal, foi usada uma agulha de diamante que ao percorrer a parede interna do furo detetou os defeitos. Estes foram transmitidos à unidade de processamento de dados via sinais elétricos.

Foi possível recolher, de cada amostra, a rugosidade média aritmética (R_a), a altura total do perfil de rugosidades (R_t) e a profundidade média da rugosidade (R_zD). A rugosidade média aritmética está relacionada com a distância entre cada ponto do perfil de rugosidade e a linha média no comprimento de cálculo. A rugosidade total tem que ver com a diferença entre o pico mais elevado e o vale mais profundo do perfil efetivo. A profundidade média da rugosidade tem que ver com a média da distância vertical entre o maior pico e o maior vale a cada comprimento de base. Foi utilizado um comprimento de base de 0.8 mm e um comprimento de palpagem de 4.8 mm (de acordo com a norma ISO/DIS 4287/IE).



Figura 3.7 – Rugosímetro Hommel Tester T1000.

3.7.2 Diâmetro e formação de Rebarba

Para estudar o diâmetro e a rebarba formada foi usado o microscópio ótico Mitutoyo® TM – 500 (Figura 3.8). Com uma ampliação de 30x foi possível analisar um quarto de furo (Figura 3.9). Recorrendo a “software” (Motic® Images Plus 2.0) de tratamento de imagem, determinou-se o diâmetro aproximado. Foi ainda estudada a formação de rebarba e para tal recolheram-se três amostras por furo.

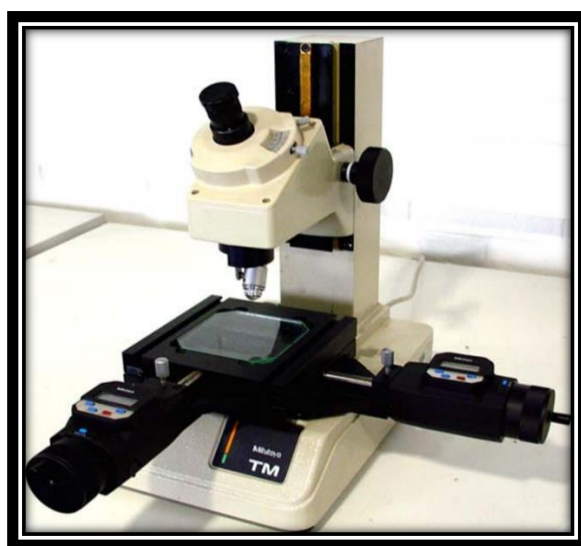


Figura 3.8 – Microscópio Ótico Mitutoyo® TM – 500.

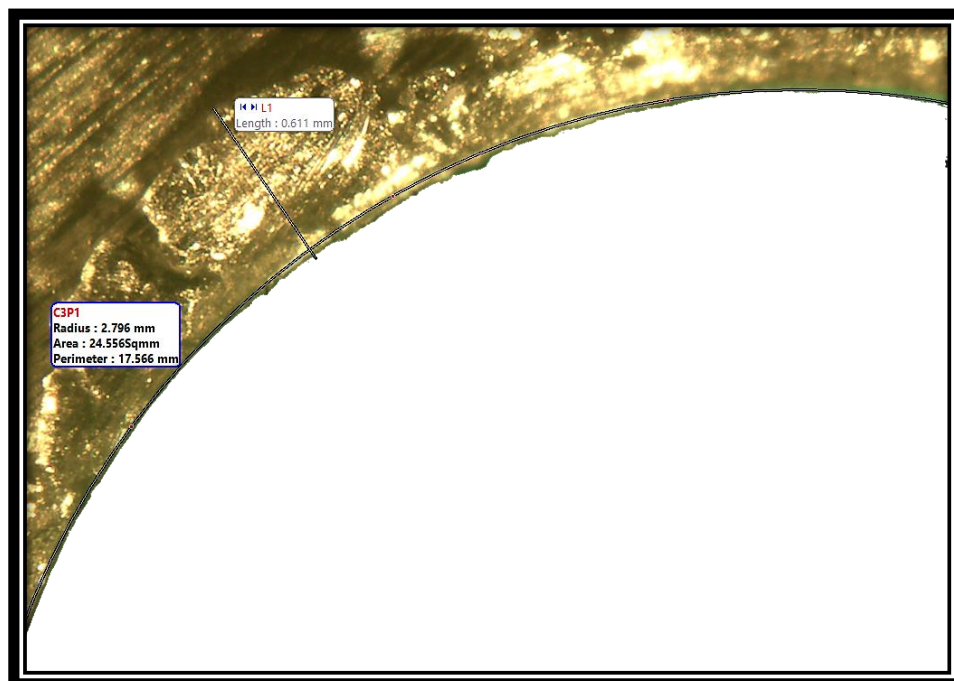


Figura 3.9 – Amostra de furo, via microscópio ótico.

3.8 Tratamento dos Resultados (Análise Estatística)

Para tratamento dos dados recolhidos foi utilizado um método estatístico ANOVA. Esta análise permite determinar a contribuição individual de cada fator e as interações para a dispersão total.

A ANOVA é extremamente aplicada na Engenharia porque permite determinar a dispersão total de um conjunto de dados, identificando as suas origens e avaliando a contribuição de cada uma das variáveis para a dispersão total. Desta forma, é possível testar a significância dos efeitos relativamente ao erro aleatório (erro de medição, fatores não controláveis, etc.) que são designados por ruídos.

Foi necessário estabelecer três níveis (elevado [1], central [0] e reduzido [-1]).

Primariamente os valores assumidos para a velocidade de corte e de avanço foram estabelecidos de acordo com o especificado pelo fabricante da ferramenta, Sandvik® Portugal. Posteriormente foram estudadas elevadas velocidades de avanço. Em cada um destes casos foi perceptível o efeito da furação a seco e com lubrificante. Cada ensaio foi repetido e a sua ordem foi aleatória.

Na tabela 3.8 é possível observar o DOE usado para a furação da liga de alumínio AA2011.

Na análise da variancia foi aplicado um nível de significância (α) de 0.05 e foi considerada uma confiança admissível de 95%.

Tabela 3.8 - Design of experiments para AA2011

Fator / Nível	Parâmetros Recomendados			Avanço Elevado		
	-1	0	1	-1	0	1
Vc	30	70	110	30	50	70
a	0.15	0.20	0.25	1	1.5	2.5
Refrigeração		Seco	Lub.		Seco	Lub.

Capítulo 4

Resultados e sua discussão

4.1 Parâmetros Processuais

A furação dos provetes decorreu de acordo com o definido no plano experimental, sendo que foram estudados o efeito dos parâmetros recomendados, elevados avanço e lubrificação.

Os parâmetros processuais selecionados condicionaram, em muito, o acabamento da superfície interna dos furos. Seguidamente estão descritos os resultados dos parâmetros recomendados e de uma velocidade de avanço mais elevada (*High-Feed*).

Na Figura 4.1 estão representadas as diferentes rugosidades (R_a [a]; R_t [b]; R_z [c]) em função dos parâmetros, velocidade de corte e velocidade de avanço.

Relativamente aos ensaios, utilizando os parâmetros recomendados pelo fabricante da ferramenta, é possível comprovar no gráfico da Figura 4.1 a) que o aumento do avanço, mantendo constante a velocidade de corte, resulta num aumento da rugosidade média aritmética (de 0,15 para 0,25 mm/rot; quer a 30 como a 110 m/min). O aumento da velocidade de corte, para o mesmo avanço, resultou numa diminuição da rugosidade média aritmética (de 30 para 110 m/min; quer a 0,15 como a 0,25 mm/rot).

Em especial, na furação a seco, quando combinadas velocidades de corte elevadas com avanço reduzidos, o resultado é um decréscimo da rugosidade aritmética. Os resultados estão em consonância com os estudos encontrados de outros autores: *Elajrami, et al*, [2013]; *Giasin, et al*, [2016]; e *Kurt, et al*, [2008].

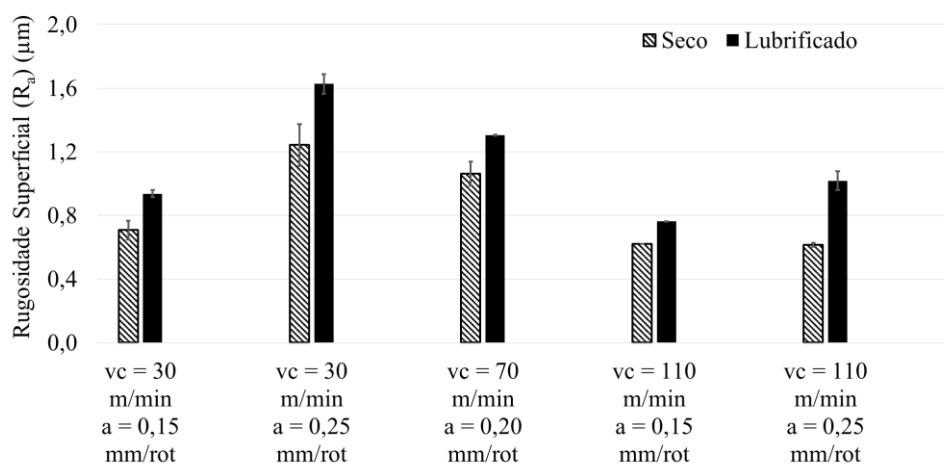
É notório na Figura 4.1 b) que os resultados da altura total do perfil de rugosidades (R_t) foram muito semelhantes, quer a seco quer com lubrificante.

Alguns autores também concluíram que é possível obter menores valores de rugosidade a seco. *Bruni, et al*, em 2006 estudaram os efeitos de lubrificantes no torneamento. Ele demonstrou que a lubrificação não teve um efeito considerável no desgaste da ferramenta (ao contrário do conhecimento convencional), mas que os ensaios lubrificados resultaram num pior acabamento de superfície [*Bruni, et al*, 2006]. *Simunovic, et al*, em 2015 também obtiveram melhores resultados no acabamento de superfície, a seco. Na fresagem que realizou, os provetes eram de pequenas dimensões, pelo que o tempo de maquinagem foi reduzido e não foi atingida uma temperatura significativa na ferramenta. Temperaturas mais elevadas afetam o tempo de vida da ferramenta, bem como os níveis de rugosidade [*Simunovic, et al*, 2015]. Condições idênticas foram adotadas nestes primeiros ensaios. O aumento da temperatura, ao nível da ferramenta, foi mínimo.

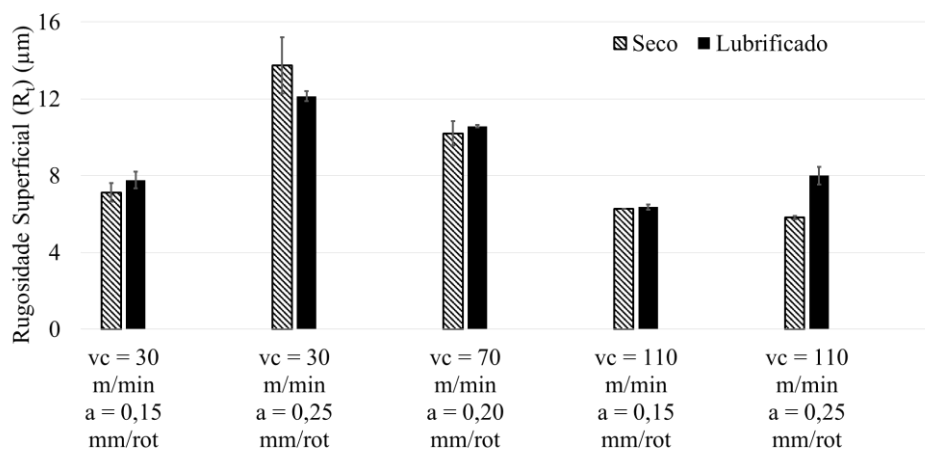
É no entanto de ressaltar o pequeno aumento da rugosidade, em alguns dos casos, aquando da utilização do lubrificante. Melhores resultados na furação a seco poderão estar relacionados com a ação direta das aparas formadas. Em avanços menores, as aparas tendem a ser mais pequenas. Assim sendo, caso estas não sejam ‘automaticamente’ expulsas do interior do furo, elas podem causar danos na superfície maquinada (resultando num aumento da rugosidade). Outro fator em jogo é a lubrificação abundante. Como esta é direcionada ao furo, isto pode dificultar a saída das aparas formadas (de menores dimensões), permitindo que estas causem estragos.

Na Figura 4.1 c) é possível verificar os resultados da profundidade média da rugosidade (R_z), sendo esta, geralmente, mais sensível às mudanças no acabamento superficial do que R_a . De destacar que neste caso os valores a seco e lubrificado encontram-se mais próximos.

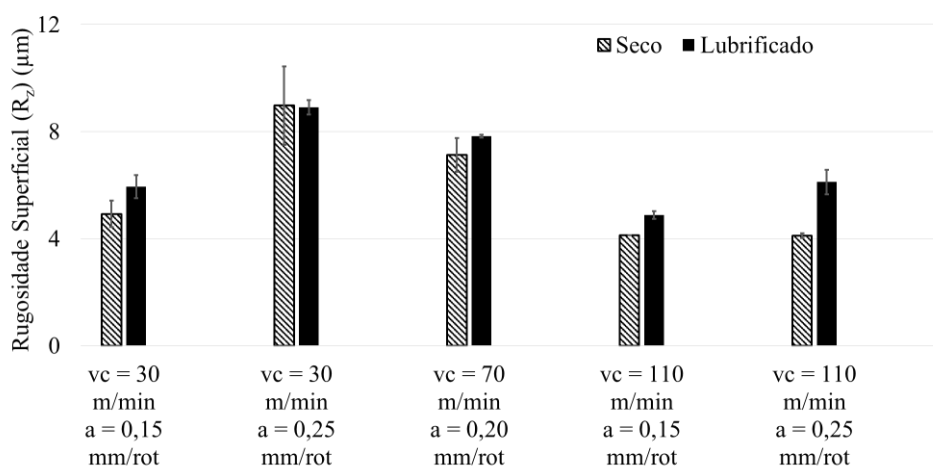
4.1.1 Segundo os parâmetros recomendados



a) Rugosidade superficial R_a na furação da liga de alumínio AA2011



b) Rugosidade superficial R_t na furação da liga de alumínio AA2011



c) Rugosidade superficial R_z na furação da liga de alumínio AA2011

Figura 4.1 – Rugosidade superficial em função da velocidade de corte e de avanço (Parâmetros recomendados).

O estudo relativo às velocidades de avanço (“High-Feed”) tornou-se imensamente importante, em especial por originar taxas de produção mais elevadas. Na Figura 4.3 encontram-se os valores de rugosidade para elevados avanços. Na Figura 4.3 a) é notório o aumento considerável da rugosidade média aritmética. De salientar que para a mesma velocidade de corte, de 30 m/min, a condição ideal de avanço será próxima de 1,5 mm/rot.

No que diz respeito à altura total do perfil de rugosidades (R_t), na figura 4.3 b), para a furação a seco, é claro o aumento da rugosidade em função do aumento do avanço (de 1,0 para 2,5 mm/rot; a 30 m/min). O aumento da velocidade de corte resultou numa diminuição da rugosidade (de 50 para 70 m/min; com 1,0 mm/rot). Os piores resultados foram obtidos para furação a seco. Isto porque em elevadas velocidades de avanço, as temperaturas envolvidas são mais elevadas e as aparas adquirem maiores dimensões. Em determinados furos o acabamento foi tão pobre, que isso foi visível a olho nu, sem realizar a leitura no rugosímetro (Figura 4.2).

Nestes ensaios os resultados obtidos com a ação do lubrificante foram melhores. Em velocidade de avanço mais elevadas, o efeito do lubrificante é mais pronunciado. As aparas adquirem maiores dimensões, sendo assim mais fácil expulsá-las. O tempo de corte é significativamente menor, pelo que as aparas estão menos tempo em contacto com a superfície interna do furo. Com o uso de lubrificante os resultados melhoraram com o aumento da velocidade de corte.

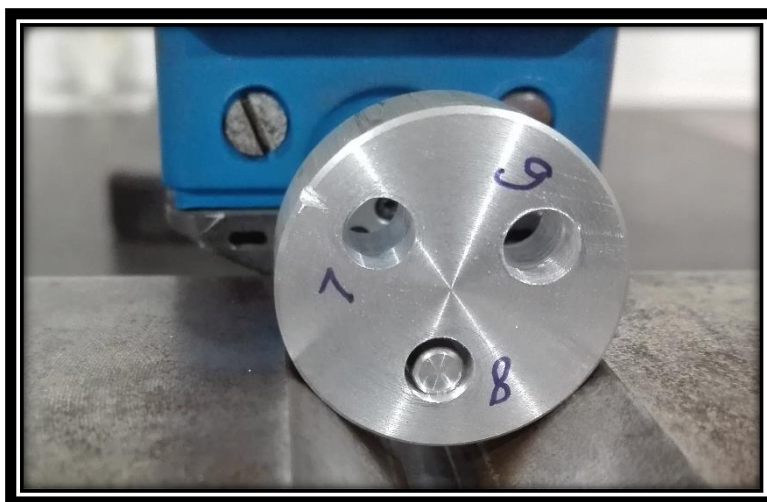
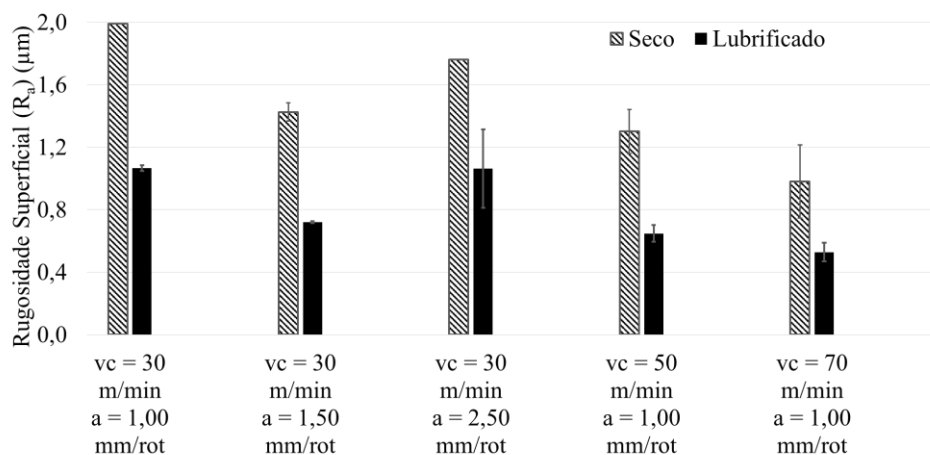
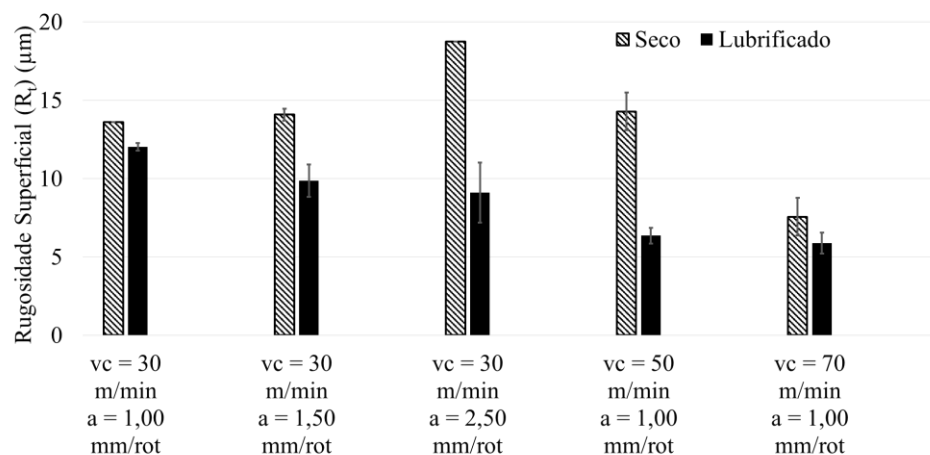


Figura 4.2 – Leitura da Rugosidade.

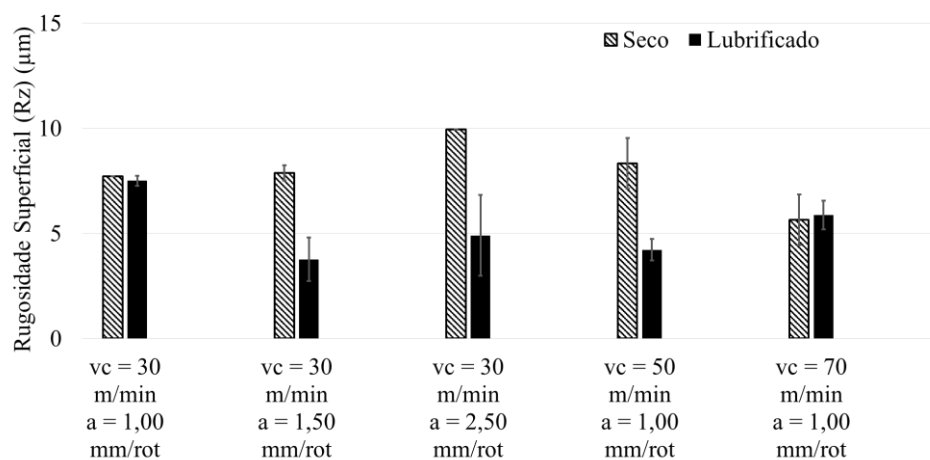
4.1.2 Aplicando elevadas velocidades de avanço



a) Rugosidade superficial R_a na furação da liga de alumínio AA2011



b) Rugosidade superficial R_t na furação da liga de alumínio AA2011



c) Rugosidade superficial R_z na furação da liga de alumínio AA2011

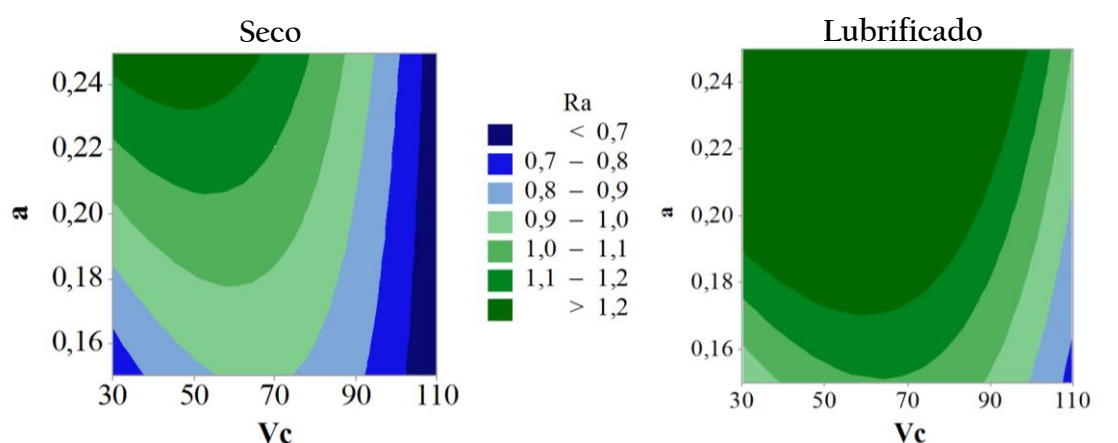
Figura 4.3 – Rugosidade superficial em função da velocidade de corte e de avanço (Avanços elevados).

4.1.3 Comparação entre parâmetros recomendados e elevadas velocidades de avanço

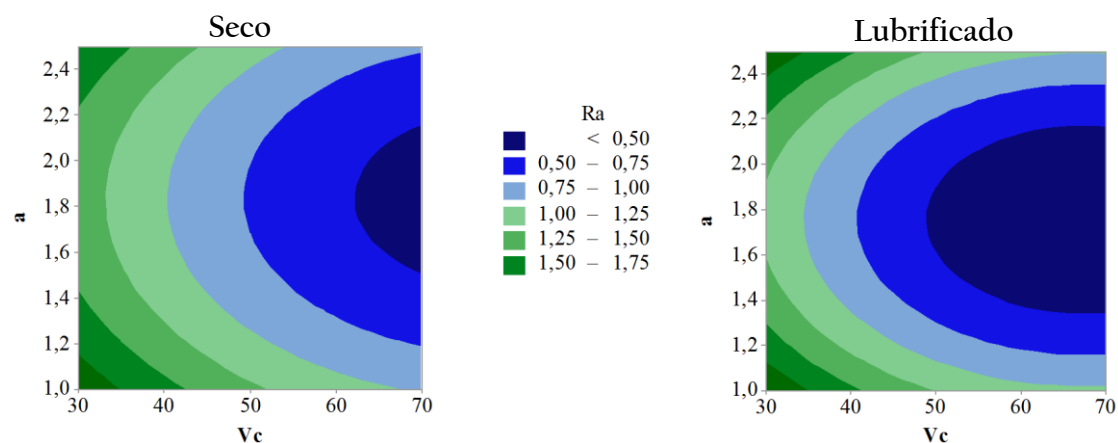
Na Figura 4.4 estão representados os contornos da rugosidade aritmética para as diferentes condições testadas. É possível perceber o claro efeito da velocidade de corte, uma vez que os melhores valores de rugosidade estão associados a elevadas velocidades de corte.

Estes resultados atestam que é possível adotar maiores ritmos de maquinagem, sem comprometer o acabamento de superfície. Por exemplo, para uma velocidade de corte de 70 m/min, com uma velocidade de avanço quase dez vezes superior (de 0,18 para 1,8 mm/rot) é possível obter um melhor acabamento de superfície.

De destacar que na Figura 4.4 b) os melhores valores tendem a convergir para um ponto, sem a necessidade de ter de se conjugar a velocidade de corte com a velocidade de avanço.



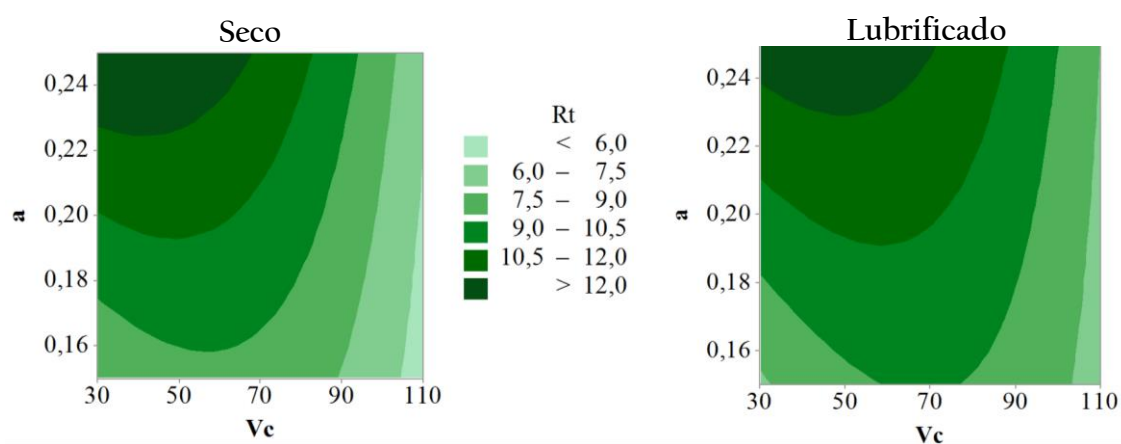
a) - Rugosidade (Ra) segundo o recomendado.



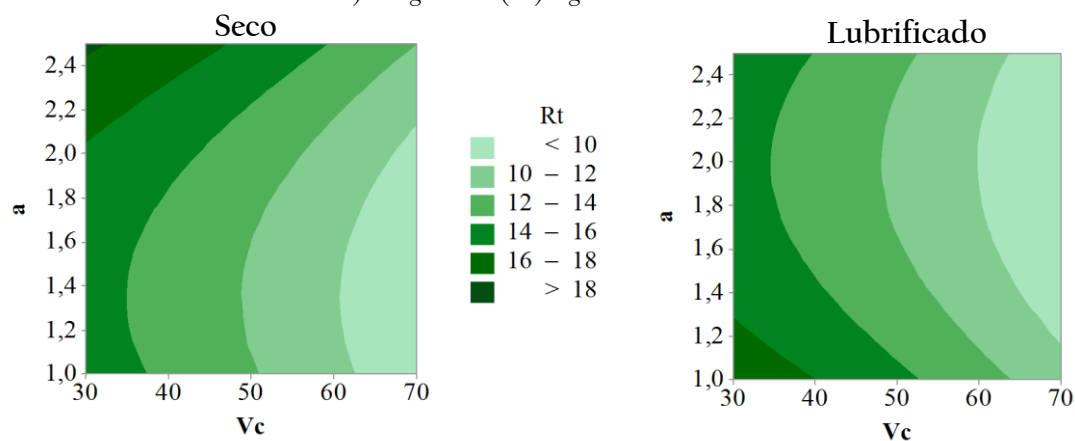
b) - Rugosidade (Ra) para avanços elevados.

Figura 4.4 – Comparação Rugosidade superficial (Ra) em função da velocidade de corte e de avanço.

No que diz respeito à altura total do perfil de rugosidades (R_t), na Figura 4.5, é possível perceber que a lubrificação tem um efeito mais pronunciado com o aumento da velocidade de avanço. Para velocidades de corte mais elevadas a velocidade de avanço apresenta uma influência menor.



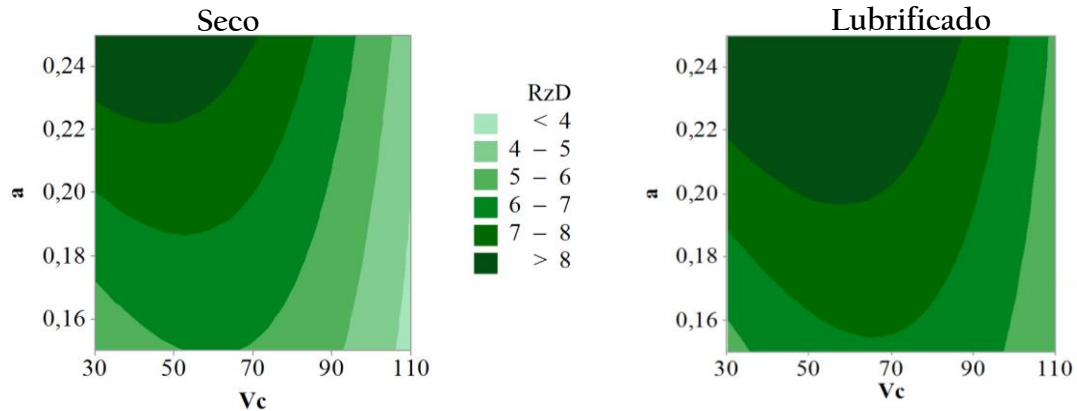
a) - Rugosidade (R_t) segundo o recomendado.



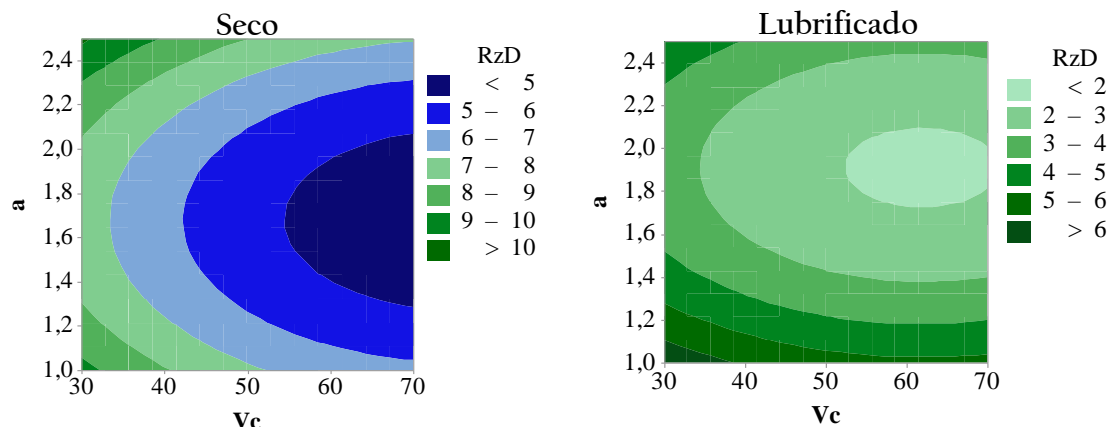
b) - Rugosidade (R_t) para avanços elevados.

Figura 4.5 - Comparação Rugosidade superficial (R_t) em função da velocidade de corte e de avanço.

A maior sensibilidade da profundidade média da rugosidade (R_z), na Figura 4.6, permite perceber o aumento considerável de danos com o aumento da velocidade de avanço, em particular para furação a seco.



a) - Rugosidade (Rz) segundo o recomendado.



b) - Rugosidade (Rz) para avanços elevados.

Figura 4.6 - Comparação Rugosidade superficial (Rz) em função da velocidade de corte e de avanço.

4.2 Rebarba do furo

O termo ‘Rebarba’ é utilizado para indicar a presença de material numa aresta a analisar, material este que surge após um processo de maquinagem.

Na furação é formada rebarba na face de entrada (compressão) e na face de saída (estiramento), observável na Figura 4.7. No entanto, nesta análise apenas foi estudada a rebarba na face de saída, uma vez que é a mais pertinente e que, por norma, é a que atinge maiores dimensões (sendo necessários processos complementares para a sua remoção).

Na Figura 4.8 é possível observar a formação de rebarba em função das diferentes condições de corte. Os resultados a seco e lubrificado não foram muito diferentes nos ensaios realizados segundo os parâmetros recomendados, Figura 4.8 a).

Nos ensaios com elevadas velocidades de avanço é possível perceber que o aumento da velocidade de corte resulta numa diminuição da rebarba formada, isto para furação a seco. No entanto, este mesmo aumento da velocidade de corte resulta num aumento da rebarba para ensaios lubrificados. Tais fenômenos estão em muito, associados a efeitos da temperatura, quer da ferramenta quer do material.

Aumentos de avanço tem um efeito bem pronunciado no aumento das dimensões da rebarba formada (de 1,0 até 2,5 mm/rot; a 30 m/min), isso está de acordo com estudos feitos nesta área, nomeadamente Sofronas e Taraman, 1976; Ko et al, 2003; e Karnik e Gaitonde, 2008.

Rebarbas de grandes dimensões são comuns em velocidades de avanço elevadas, sendo o resultado do material aderido que provoca maiores deformações [Stein e Dornfeld, 1997].

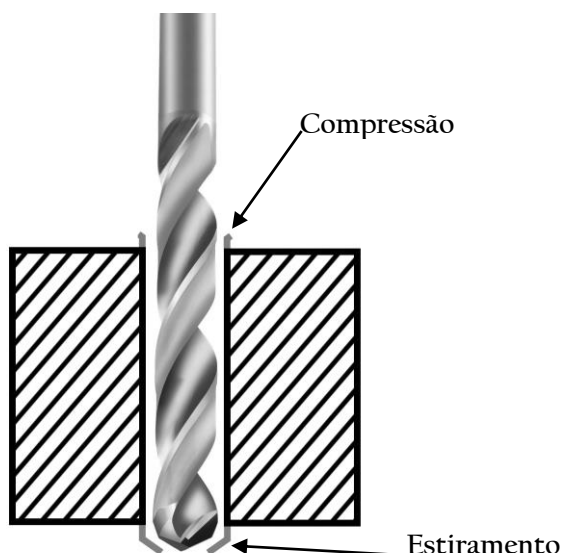
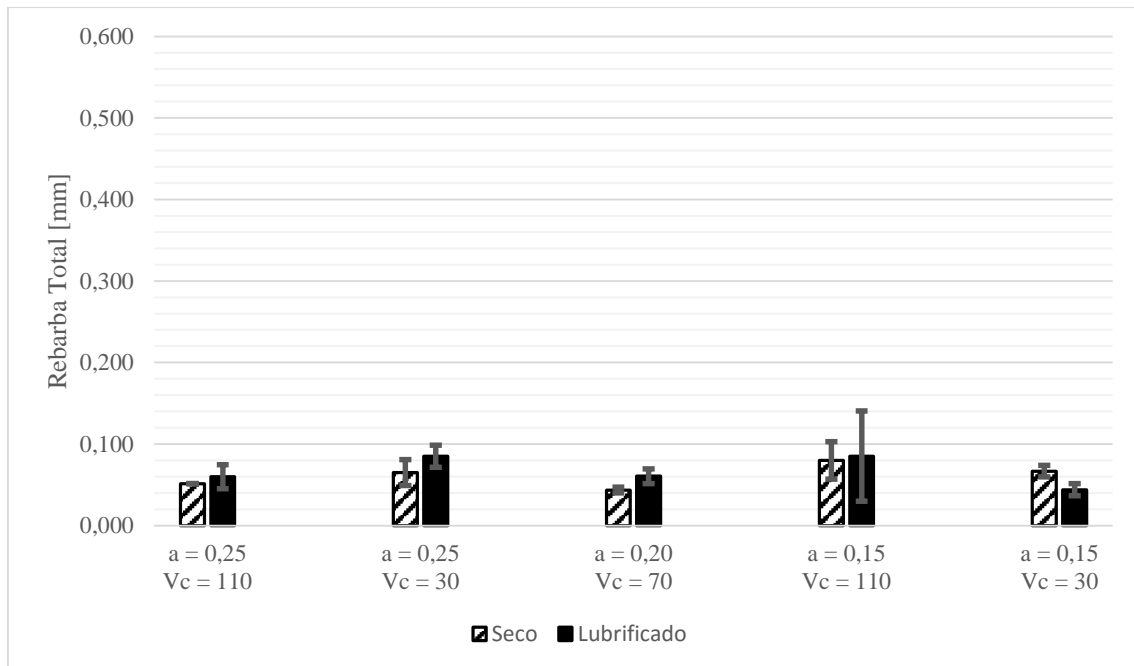


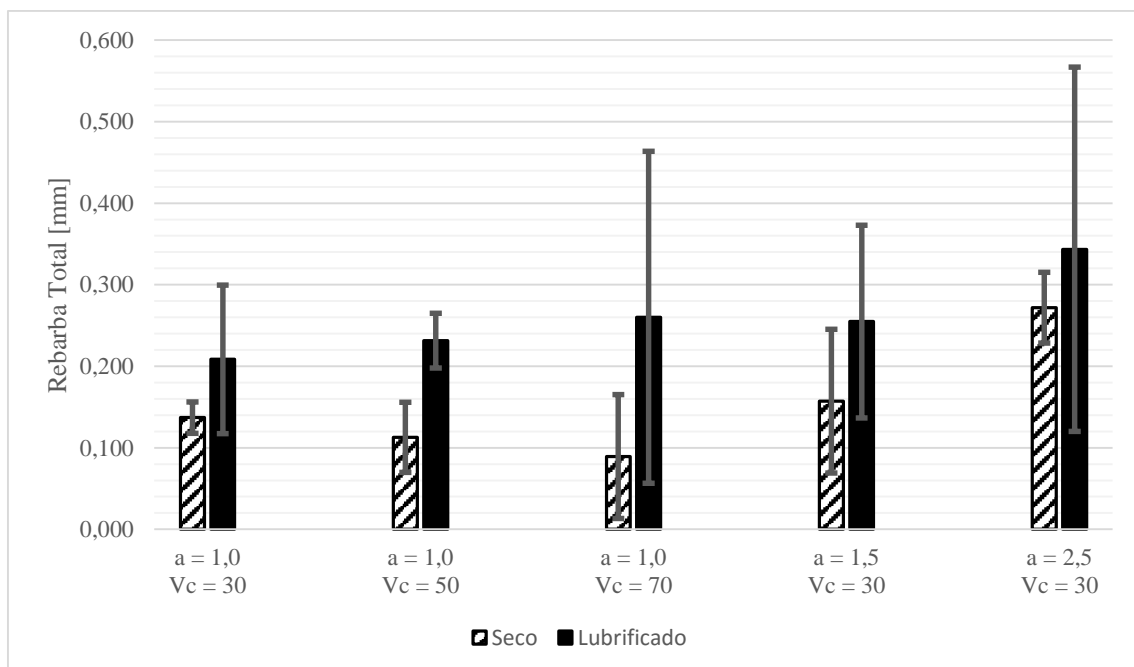
Figura 4.7- Representação da formação da rebarba.

Em especial para velocidades de avanço elevadas, a ação do fluido de corte conduziu a piores resultados na formação de rebarba. Isto porque um fluido de corte tem duas funções principais. Funciona como refrigerante e como lubrificante. Normalmente, a ação do lubrificante prevalece em velocidades de corte inferiores, enquanto que a do refrigerante nota-se em velocidades de corte superiores. Ambas as funções terão influência na formação da rebarba porque condicionam a deformação plástica do material. O refrigerante reduz a ductilidade do material (e a sua capacidade de se deformar). O lubrificante reduz as forças e conseqüentes tensões e deformações necessárias à formação de rebarba. Assim, a influência de um fluido de corte depende em

muito da sua eficiência como refrigerante e lubrificante [Trent, 2000; Machado e Silva, 2004].



a) – Rebarba segundo os parâmetros recomendado.



b) – Rebarba para avanços elevados.

Figura 4.8 – Rebarba em função dos parâmetros seleccionados.

4.3 Diâmetro do furo

A precisão dimensional é um fator importantíssimo na avaliação da qualidade de um componente.

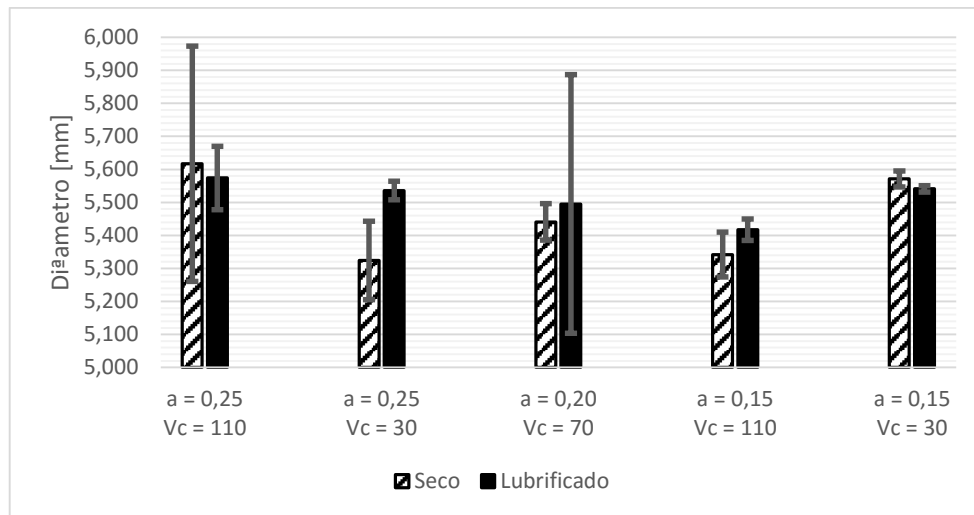
A qualidade de superfície é mais crítica na maquinagem do alumínio em comparação com o aço. Uma vez que o módulo de elasticidade é um terço do aço, o alumínio deforma-se três vezes mais que o aço, para as mesmas condições de corte. Estas deformações dificultam, em muito, a precisão dimensional [Leep, 2006].

Na Figura 4.9 é possível perceber as dimensões do diâmetro dos furos, em função dos parâmetros processuais (quer segundo os parâmetros recomendados, quer em avanços elevados). As principais discrepâncias observaram-se nas condições de velocidades de avanço mais elevado (não foram obtidos diâmetros menores que 5,45 mm). A diferenciação entre a furação seco e lubrificada foram reduzidas.

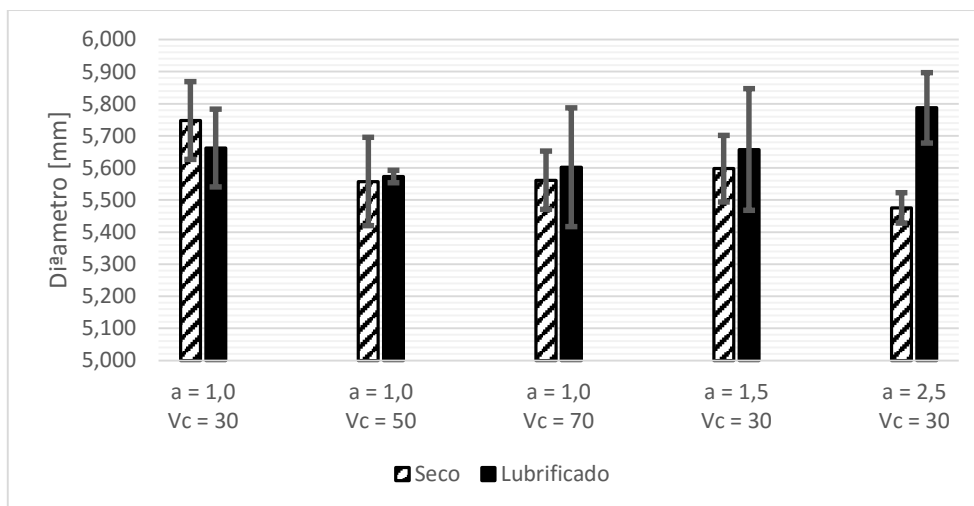
O aumento do diâmetro, em relação aos 5 mm da broca, pode ser explicado por várias razões. Uma prende-se com a deflexão que a ferramenta sofre. O impacto da broca com o material, no movimento descendente, pode contribuir para a sua deflexão, o que danificará a precisão dimensional do diâmetro. Outro aspeto tem que ver com as vibrações induzidas na broca. Tal efeito piora com o aumento dos parâmetros de corte, uma vez que a ferramenta está sujeita a maiores tensões, que resultam em vibrações axiais e de torção. Este mesmo efeito foi verificado por Kurt, et al [Kurt, et al, 2008].

A precisão dimensional torna-se importantíssima, especialmente quando elementos de ligação ‘passarão’ pelos furos. Elementos como parafusos, rebites, etc., possuem dimensões standardizadas. Caso as dimensões do furo sejam significativamente diferentes, podem comprometer o bom funcionamento do produto final (por exemplo: impossibilitando uma ligação segura entre componentes).

Foi possível realizar um ensaio comparativo e perceber a diferença entre a furação convencional e a utilização de um mandril. No ensaio em que foi usado o mandril, foi estabelecido um avanço de 0,25 mm/rot e uma velocidade de corte de 24 m/min. O melhor diâmetro obtido na furação convencional foi de 5,385 mm, enquanto ao usar o mandril foi atingido um diâmetro de 5,048 mm (Figura 4.10). O uso do mandril revela-se ideal para aplicações de elevada precisão.



a) – Diâmetro segundo os parâmetros recomendado.



b) – Diâmetro para avanços elevados.

Figura 4.9 – Diâmetro em função dos parâmetros seleccionados.

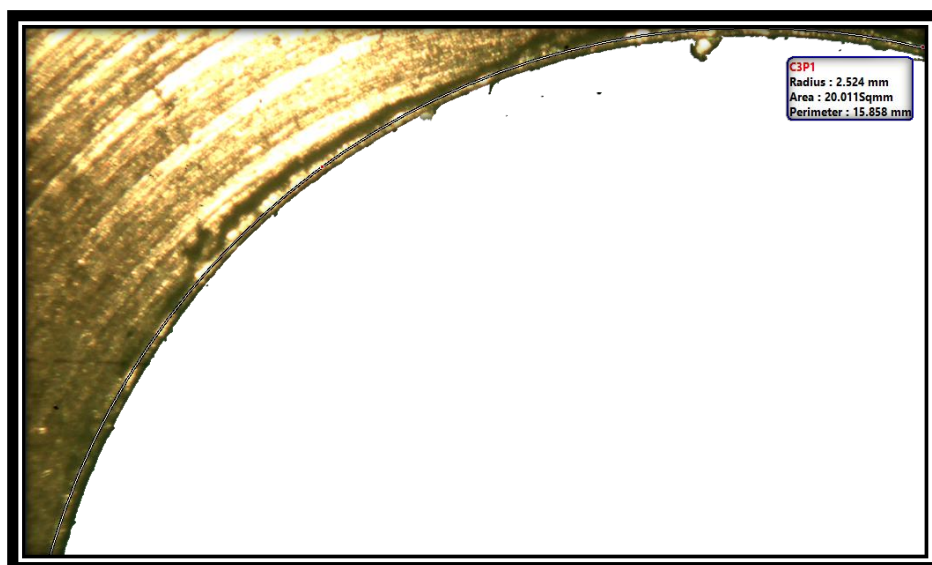


Figura 4.10 – Diâmetro de furo realizado com mandril.

4.4 Tipo de Apra

Apenas foi possível estudar a formação da apra, nos ensaios a seco. Isto porque nos ensaios com lubrificação o caudal de fluido era muito abundante, pelo que as apras foram projetadas e não foi possível fazer uma recolha coerente. No entanto, com os dados recolhidos é possível verificar a influência dos parâmetros de corte na formação de apras. Na Figura 4.11 encontra-se a apra formada nos ensaios segundo parâmetros recomendados e na Figura 4.12 estão os resultados para avanços elevados.

Para os ensaios segundo os parâmetros recomendados, é notória a diferença na espessura das apras. Para avanços menores as apras são mais finas e mais pequenas. As maiores apras, nos primeiros ensaios, foram obtidas na conjugação da maior velocidade de corte e maior avanço. As apras de menor dimensão foram obtidas para as condições maior velocidade de corte e menor avanço (melhor acabamento de superfície).

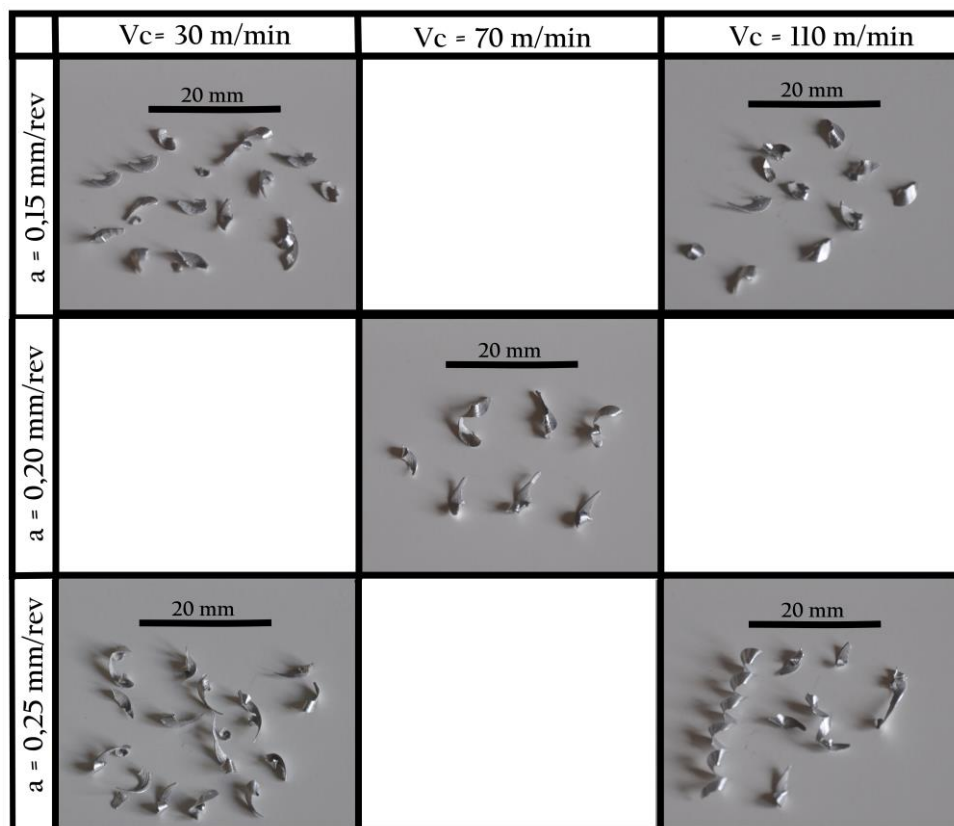


Figura 4.11 – Apra em função de velocidade de corte e velocidade de avanço.

Para os ensaios com elevados avanços é notório o aumento da espessura das aparas. O aumento do avanço, para a mesma velocidade de corte, resultou em aparas maiores. A velocidade de corte não teve um efeito muito pronunciado.

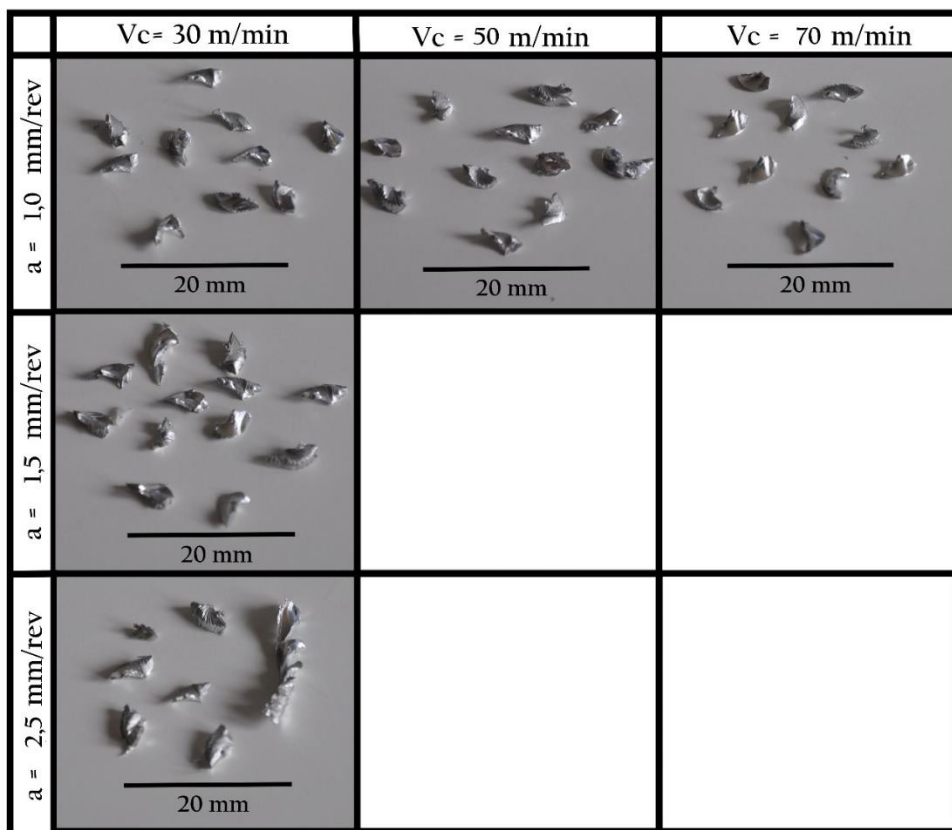


Figura 4.12 – Apara em função da velocidade de corte e velocidade de avanço.

4.5 Otimização

Na Tabela 4.1 consta a análise da variância segundo os parâmetros recomendados para a liga de alumínio AA2011. A interação da velocidade de corte e do avanço foi significativa no perfil de rugosidades. O uso do lubrificante não foi significativo para a altura total do perfil de rugosidades (R_t). As correlações segundo os parâmetros recomendados estão presentes na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 - ANOVA Segundo os parâmetros recomendados.

	Ra		Rt		Rz		Diâmetro	
	Valor de F	Valor de P	Valor de F	Valor de P	Valor de F	Valor de P	Valor de F	Valor de P
Modelo corrigido	52,068	<u>0,000</u>	8,374	<u>0,002</u>	17,069	<u>0,000</u>	0,514	0,834
Vc	128,205	<u>0,000</u>	27,247	<u>0,001</u>	55,047	<u>0,000</u>	0,003	0,957
a	124,809	<u>0,000</u>	19,617	<u>0,002</u>	41,133	<u>0,000</u>	0,205	0,661
Lubrificação	84,645	<u>0,000</u>	0,297	0,599	8,886	<u>0,015</u>	0,345	0,570
Vc * a	53,613	<u>0,000</u>	12,791	<u>0,006</u>	20,489	<u>0,001</u>	2,956	0,116
Vc * Lubrificação	0,205	0,661	1,381	0,270	2,025	0,188	0,142	0,714
a * Lubrificação	10,051	<u>0,011</u>	0,003	0,956	0,021	0,888	0,097	0,762
Vc * a * Lubrificação	0,689	0,428	2,518	0,147	3,315	0,102	0,819	0,387
	R ²	R ² _{aj}	R ²	R ² _{aj}	R ²	R ² _{aj}	R ²	R ² _{aj}
	0,981	0,962	0,893	0,787	0,945	0,889	0,316	-0,299

Tabela 4.2 - Correlações segundo os parâmetros recomendados pelo fabricante

Correlação Resposta	τ de Kendall				ρ de Spearman			
	Ra	Rt	Rz	Diâmetro	Ra	Rt	Rz	Diâmetro
Vc	-0,386	-0,497	-0,469	-0,167	-0,459	<u>-0,600</u>	<u>-0,556</u>	-0,204
a	0,393	0,383	0,398	0,071	0,448	0,426	0,448	0,078
Lub	0,324	0,145	0,210	0,204	0,385	0,173	0,250	0,243

$$Ra = -0,766 + 0,02889 Vc + 6,899 a - 0,110 Lub - 0,000153 Vc*Vc - 0,06014 Vc*a - 0,000326 Vc*Lub + 2,061 a*Lub \quad (4.0)$$

$$Rt = -6,84 + 0,2378 Vc + 74,0 a - 0,56 Lub - 0,001277 Vc*Vc - 0,584 Vc*a + 0,0231 Vc*Lub - 3,2 a*Lub \quad (4.1)$$

$$Rz = -4,15 + 0,1646 Vc + 45,64 a + 0,07 Lub - 0,000942 Vc*Vc - 0,3482 Vc*a + 0,01287 Vc*Lub - 0,25 a*Lub \quad (4.2)$$

$$Diã. = 6,048 - 0,0101 Vc - 2,82 a - 0,009 Lub + 0,000014 Vc*Vc + 0,0425 Vc*a - 0,00094 Vc*Lub + 0,65 a*Lub \quad (4.3)$$

Na Tabela 4.3 está a análise da variância para avanços elevados na furação da liga de alumínio AA2011. O avanço não foi significativo para o Rt e Rz, foi, no entanto, o único parâmetro significativo para o diâmetro. Na Tabela 4.4 observa-se a correlação para avanços elevados. O uso de lubrificante apresentou correlação com praticamente todas as rugosidades.

Tabela 4.3 – ANOVA para avanços elevados.

	Ra		Rt		Rz		Diâmetro	
	Valor de F	Valor de P	Valor de F	Valor de P	Valor de F	Valor de P	Valor de F	Valor de P
Modelo corrigido	17,371	<u>0,000</u>	12,007	<u>0,001</u>	6,015	<u>0,009</u>	3,377	0,036
Vc	26,518	<u>0,000</u>	14,443	<u>0,002</u>	2,623	0,133	0,750	0,497
a	10,280	<u>0,006</u>	1,403	0,300	3,087	0,101	6,727	<u>0,014</u>
Lubrificação	75,683	<u>0,000</u>	56,071	<u>0,000</u>	35,280	<u>0,000</u>	3,356	0,097
Vc *	2,404	0,152	5,653	<u>0,029</u>	5,069	<u>0,038</u>	0,274	0,766
Lubrificação								
a * Lubrificação	0,630	0,557	5,206	<u>0,036</u>	4,214	0,056	2,317	0,149
	R ²	R ² _{aj}	R ²	R ² _{aj}	R ²	R ² _{aj}	R ²	R ² _{aj}
	0,951	0,897	0,931	0,854	0,871	0,726	0,752	0,53

Tabela 4.4 - Correlações para os avanços elevados.

Correlação Resposta	τ de Kendall				ρ de Spearman			
	Ra	Rt	Rz	Diâmetro	Ra	Rt	Rz	Diâmetro
Vc	-0,413	<u>-0,505</u>	-0,116	0,137	-0,493	<u>-0,627</u>	-0,168	0,165
a	0,249	0,267	-0,060	0,069	0,301	0,321	-0,084	0,110
Lub	<u>-0,615</u>	-0,453	<u>-0,560</u>	-0,305	<u>-0,733</u>	<u>-0,539</u>	<u>-0,668</u>	-0,364

$$Ra = 5,672 - 0,0642 Vc - 2,983 a - 1,267 Lub + 0,000402 Vc*Vc + 0,813 a*a + 0,00983 Vc*Lub + 0,126 a*Lub \quad (4.4)$$

$$Rt = 22,4 - 0,063 Vc - 7,5 a + 0,22 Lub - 0,00095 Vc*Vc + 2,81 a*a - 0,0054 Vc*Lub - 3,64 a*Lub \quad (4.5)$$

$$Rz = 24,24 - 0,227 Vc - 13,49 a - 1,95 Lub + 0,00151 Vc*Vc + 4,02 a*a + 0,0407 Vc*Lub - 1,85 a*Lub \quad (4.6)$$

$$Diã. = 5,891 + 0,0078 Vc - 0,718 a + 0,044 Lub - 0,000035 Vc*Vc + 0,228 a*a - 0,00484 Vc*Lub + 0,0490 a*Lub \quad (4.7)$$

4.5.1 Comparação dos processos

Na Figura 4.13 são comparadas as correlações entre os parâmetros recomendados e avanços elevados. As correlações são similares na velocidade de corte, velocidade de avanço, Ra e Rt. No entanto, a lubrificação apresentou uma correlação contrária, comparando os parâmetros recomendados com avanços elevados.

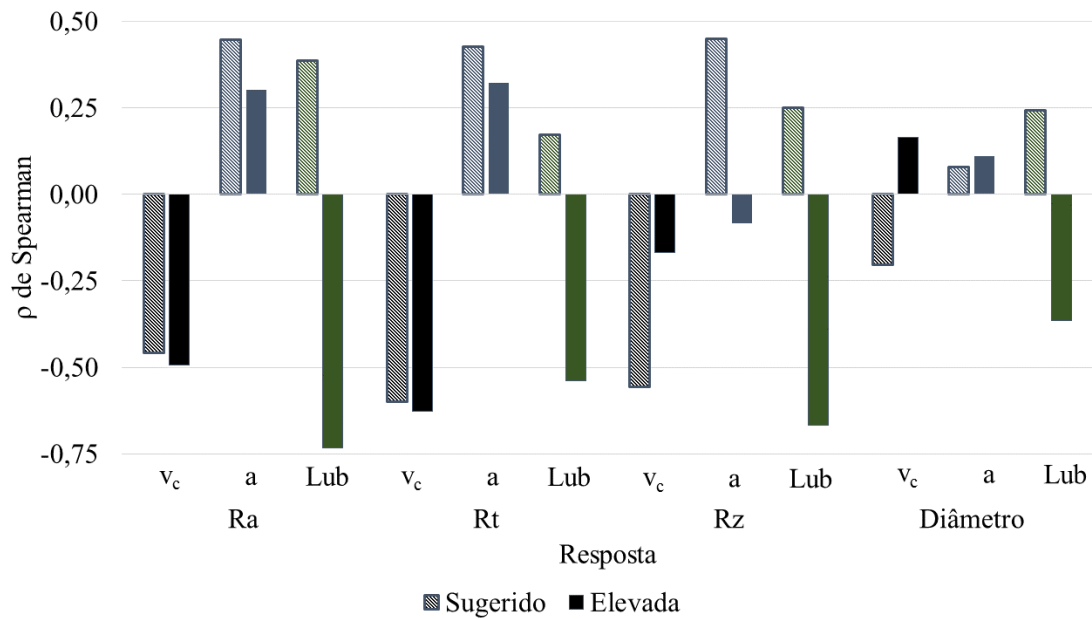
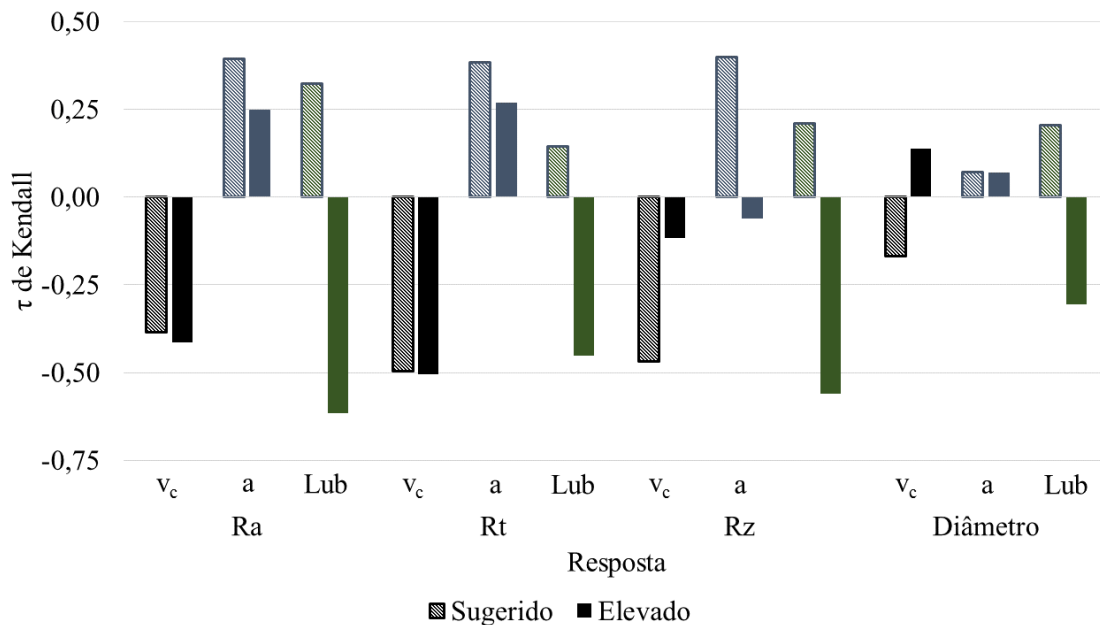
a) Comparação da correlação de ρ de Spearmanb) Comparação da correlação de τ de Kendall

Figura 4.13 – Comparação das correlações para convencional e elevado avanço.

As condições ótimas estão expressas na Tabela 4.5. Através das equações (4.0 – 4.7) e substituindo-as pelos valores selecionados de velocidade de corte e avanço, foi possível descobrir os menores valores atingidos.

Segundo os parâmetros recomendados a melhor condição foi para $V_c = 110$ m/min e $V_a = 0.15$ mm/rev. Para avanços mais elevados, a condição ótima foi para avanços a variar entre 1.46 - 1.76 mm/rot e uma velocidade de corte próxima dos 70 m/min (Figura 4.14).

Tabela 4.5 - Condições ótimas.

	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Lubrificação	Valor
Rugosidade superficial Ra				
Convencional	110	0.15	Não	0,6031
Elevada	67.65	1.76	Sim	0.0567
Rugosidade superficial Rt				
Convencional	110	0.15	Não	5.3303
Elevada	70	1.98	Sim	2.1361
Rugosidade superficial Rz				
Convencional	110	0.15	Não	3.6585
Elevada	61.69	1.91	Sim	1.9097
Diâmetro				
Convencional	110	0.15	Não	5.3848
Elevada	70	1.46	Sim	5.4800

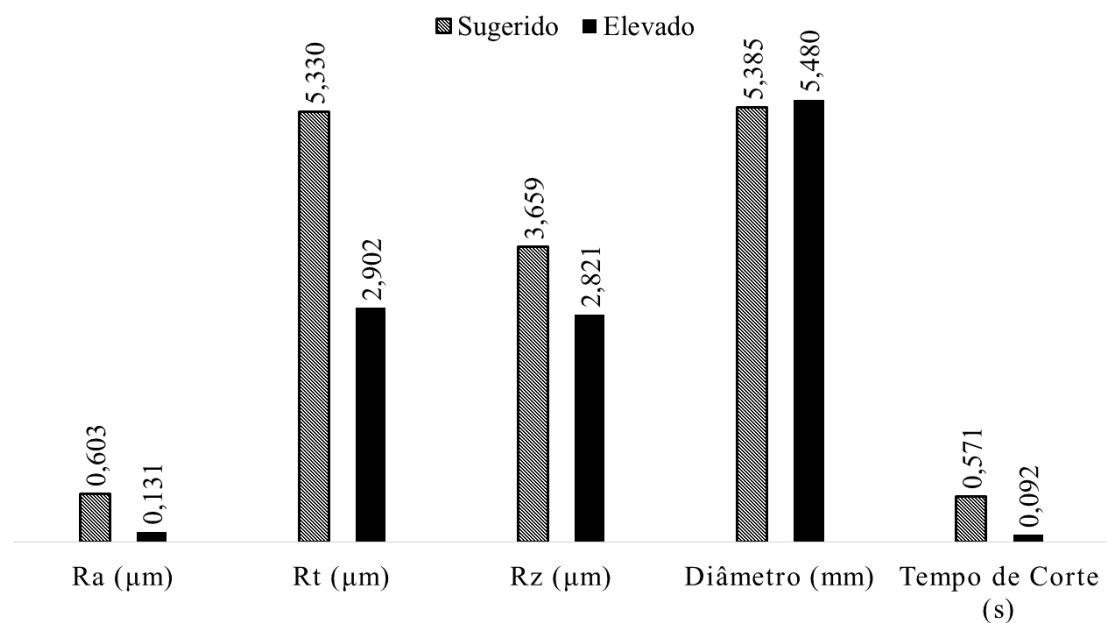


Figura 4.14 – Comparação das condições ótimas.

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

Consideram-se pertinentes as seguintes conclusões, para as ferramentas testadas e para a liga de alumínio AA2011:

- Foi possível verificar a influência dos parâmetros de corte na qualidade do furo. Relativamente à velocidade de avanço, (quer segundo os parâmetros recomendados, quer em avanços elevados), um aumento desta, por norma, resultou num aumento da rugosidade (piorando o acabamento de superfície). Na velocidade de corte, em ambos os casos, o seu aumento contribuiu para a diminuição da rugosidade (melhor acabamento de superfície).
- A diferença entre a furação a seco e lubrificada, não foi muito pronunciada na maioria dos ensaios realizados (em especial na rugosidade superficial (Rz) e na rebarba, segundo os parâmetros recomendados; e no diâmetro, para avanços elevados). Tais resultados atestam a viabilidade da furação a seco.
- Com o estudo das velocidades de avanço elevadas, em casos particulares, foram atingidos melhores resultados no acabamento de superfície (rugosidade). De salientar, que de uma forma geral, os resultados pioraram no que diz respeito ao acabamento de superfície (rugosidade) e diâmetro.
- A formação de rebarba foi especialmente notória nos ensaios de avanço elevado. Segundo os parâmetros recomendados, a formação de rebarba não assumiu valores superiores a 0,09 mm e a diferença entre a seco e lubificado foi praticamente nula.

- A precisão dimensional atingida foi semelhante, quer segundo os parâmetros recomendados, quer em avanços elevados. Atingiram-se valores de diâmetro de 5,750 mm, diâmetros significativamente maiores do que os 5,0 mm esperados. O estudo comparativo com o mandril permitiu perceber a clara diferença nas dimensões do furo conseguido adotando este método.
- A peça resultante do processo de furação não atingiu dimensões muito consideráveis, na maioria dos ensaios.
- Graças à otimização desenvolvida, foi possível descobrir os parâmetros para atingir os melhores resultados. É recomendado o uso de velocidade de corte de 110 m/min e um avanço de 0.15 mm/rot para obter um melhor diâmetro. A condição para obter o melhor acabamento superficial (R_a) é de $V_c=67,65$ m/min e $a=1,76$ mm/rot.

Na sequência do trabalho realizado, na presente dissertação, poderão ser projetados novos desafios e desenvolvimentos no sentido de alargar os conhecimentos da furação do alumínio:

- Utilizar um número maior de ferramentas, com diferentes revestimentos e diâmetros, permitindo perceber os efeitos destes mesmos no acabamento final.
- Adotar profundidades de furação maiores e recorrer ao estudo de técnicas tais como o pré-furo.
- Testar outros métodos de lubrificação, como por exemplo, a lubrificação mínima (MQL).

Referências:

- [ASM International Handbook Committee] ASM International, 1990, 'ASM Handbook, Volume 02 – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials';
- [Antony, et al] Antony J., Kate M. e Frangou A., 1998, 'A strategic methodology to the use of advanced statistical quality improvement techniques', TQM Mag. 10, 169-176;
- [Ali, et al, 2011] Ali M., Adesta T., Augusman D., Badari M. e Al-Hazza F., 2011, 'Development of Surface Roughness Prediction Model for High Speed End Milling of Hardened Tool Steel', Asian Journal of Scientific Research, 4(3): 255-263. DOI: 10.3923/ajsr.2011.255.263;
- [Aluminum Association, 1993] Aluminum Association, (1993), 'Aluminum Standards and Data', 11th ed., Washington DC, August, 1993;
- [Alting, 1994] Alting L., 1994, 'Manufacturing Engineering Processes', Inc. Marcel Dekker, pp.95-100;
- [Astakhov, 2008] Astakhov V., 2008, 'Ecological machining: near-dry machining', em: Davim JP (ed) Machining: fundamentals and recent advances. Springer, London;
- [Barani, et al, 2014] Barani A., Amini S., Paktinat H., Fadaei A., 2014, 'Built-up edge investigation in vibration drilling of Al2024-T6';
- [Benes, 2008] Benes J., 2008, 'The Latest on Machining Aluminum, American Machinist';
- [Boothroyd e Knight, 1989] Boothroyd G., e Knight A., 1989, 'Fundamentals of Machining and Machine Tools', Marcel Dekker;
- [Bruni, et al, 2006] Bruni, C., Forcellese, A., Gabrielli, F., Simoncini, M., 2006, 'Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420B, Int. J. Mach. Tools Manuf. 46, 1547-1554;
- [Byrne e Scholta, 1993] Byrne G. e Scholta E., 1993, Ann. CIRP 42 471;
- [Coleman e Montgomery, 1993] Coleman D., Montgomery D., 1993, 'A systematic approach to planning for designed industrial experiment', Technometrics 35 (n. 1), 1-12;
- [Dereli, et al, 2001] Dereli D., Filiz H., Bayakosoglu A., 2001, 'Optimizing cutting parameters in process planning of prismatic parts by using genetic algorithms', Int. J. of Production Research, 39 (15) 3303–3328;
- [Dornfeld e Min, 2010] Dornfeld D., Min S., 2010, 'A Review of Burr Formation in Machining, In Burrs – Analysis, Control and Removal', Springer Berlin Heidelberg, pp.3-11;
- [Edwards, 1993] Edwards R., 1993, 'Cutting Tools, The Institute of Materials';
- [Elajrami, et al, 2013] Elajrami M., Milouki H., Boukhoulda F., 2013, 'Effect of Drilling Parameters on Hole Quality'. International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering (IJMMME) Volume 1;
- [Ekinović, et al, 2007] Ekinović S., Begović E., Silajdzija A., 2007, 'Comparison of Machined Surface Quality Obtained by High-speed Machining and Conventional Turning', Machining Science and Technology, An International Journal, 11(4), 531-551;
- [Gautam, et al, 2016] Gautam V., Pratap R., Kataria R. e Kumar J., 2016, 'A Critical Review on the Impact of Input Factors on Process Outcomes in Drilling of Aluminium Alloys', International Journal of Emerging Trends in Research, Vol. 1, pp. 12-18;
- [Giasin, et al, 2016] Giasin K., Hodzic A., Phadnis V., Ayvar-Soberanis S., 2016, 'Assessment of cutting forces and hole quality in drilling Al2024 aluminium alloy: experimental and finite element study'.
- [Groover, 1996] Groover M., 1996, 'Fundamentals of Modern Manufacturing - Materials, Process and Systems', Prentice-Hall International Editions;

- [Grzesik, 2008] Grzesik W., 2008, 'Advanced Machining Processes of Metallic Materials, Theory, Modelling and Applications', Elsevier B.V.;
- [Hamade e Ismail, 2005] Hamade F. e Ismail F., 2005, 'A case for aggressive drilling of aluminum', JI. of Mat. Proc. Tech. Vol.166, pp.86–97;
- [Hsu, et al, 1995] Hsu V., Daskin M., Jones P. e Lowe T., 1995, 'Tool selection for optimal part production: a Lagrangian relaxation approach', IIE Trans, 27 417-426;
- [Jain, 2000] Jain K., 2000, 'Optimum selection of machining conditions in abrasive flow using neural network', J. Mater. Process. Technol. 108 (1), 62-67;
- [Jimenez, et al, 2001] Jimenez M., De Mingo D., Del Real J. e Sandes V., 2001, 'Taladrado y roscado de alta velocidad'. Ediciones Técnicas IZARO, Bilbao;
- [Kalpakjian, 1995] Kalpakjian S., 1995, 'Manufacturing Engineering and Technology', Addison-Wesley;
- [Karnik e Gaitonde, 2008] Karnik S. e Gaitonde V., 2008, 'Development of artificial neural network models to study the effect of process parameters on burr size in drilling' Int J Adv Manuf Technol 439-53;
- [Kelly e Cotterell, 2002] Kelly F., Cotterell M., 2002 'Minimal lubrication machining of aluminium alloys', J. of Mat. Proc. Tech. Vol.120, pp.327–334;
- [Ko, et al, 2003] Ko S., Chang J. e Yang G., 2003, 'Burr minimizing scheme in drilling', J Mater Process Technol, 237-42;
- [Koning e Erinski, 1983] Konig W. e Erinski D., 1983, 'Machining and Machinability of Aluminium Cast Alloys', Annals of the CIRP, Vol 32, N 2;
- [Krar e Check, 1997] Krar S. e Check A., 1997, 'Technology of Machine Tools', McGraw-Hill, 5ª Edição;
- [Kundua, et al, 2014] Kundua S., Dasb S., Sahac P., 2014, 'Optimization of drilling parameters to minimize burr by providing back-up support on aluminium alloy', Procedia Engineering 97: 230 – 240;
- [Kurt, et al, 2008] Kurt M., Kaynak Y. e Bagci E., 2008, 'Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy', International Journal of Advance Manufacturing technology. Sayı 11-12. Cilt 37 sf 1051-1060;
- [Klocke e Eisenblätter, 1997] Klocke F. e Eisenblätter G., 1997, 'Dry cutting', Annals of the CIRP 46(2):519–526;
- [List, et al, 2005] List, G., Nouari M., Gomez D., Manaud S., Petitcorps P. e Girot Y., 2005, 'Wear behaviour of cemented carbide tools in dry machining of aluminium alloy', Wear, Vol.259, pp.1177–1189;
- [Leep, 2006] Leep H., 2006 'Influence of cutting fluids on surface finish of holes drilled into aluminium 390', J Synth Lubr 6: 325–338;
- [Machado, e Silva, 2000] Machado A. e Silva M., 2000, 'Usinagem dos Metais', Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, 8ª versão;
- [Moufki, et al, 1998] Moufki A., Molinari A., Dudzinski D., 1998, 'Modelling of orthogonal cutting with a temperature dependent friction law', Journal of the Mechanics and Physics of Solids 46 2103-2138;
- [Nouari, et al, 2005] Nouari M., List G., Girot F. e Géhin G., 2005, 'Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys', Int. J. of Machine Tools & Manuf. Vol.45, pp.1436–1442;
- [Olivo, 1987] Olivo C., 1987, 'machine tool technology and manufacturing processes';
- [Pandey e Pal, 1995] Pandey P., Pal S., 1995, 'Proceedings of the Third International Conference in Computer Integrated Machining Singapore', 1 812–819;

- [Rajmohan, et al, 2013] Rajmohan T., Palanikumar K. e Prakash S., 2013, 'Grey-fuzzy algorithm to optimise machining parameters in drilling of hybrid metal matrix composites', *Composites Part B: Engineering* 50: 297-308;
- [Richardson, 1987] Richardson T., 1987, 'Composites - A design guide', Industrial Press Inc., New York;
- [Rivero, et al, 2006] Rivero A., Aramendi G., Herranz S. e Lopez N., 2006, 'An experimental investigation of the effect of coatings and cutting parameters on the dry drilling performance of aluminium alloys', *Int J Adv Manuf Technol*, Vol.28, pp.1-11;
- [Rodrigues e Martins, 2010] Rodrigues J., Martins P., 2010, 'Tecnologia Mecânica – Tecnologia da Deformação Plástica', Vol. I – Fundamentos Teóricos;
- [Sandvik Portugal] Sandvik Portugal. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/Pages/productdetails.aspx?c=r846-0500-30-a1a%2B1220&Country=pt>
- [Shaw, 1997] Shaw C., 1997, 'Metal Cutting Principles', Oxford Science Publications;
- [Simunovic, et al, 2015] Simunovic, K., Simunovic, G. e Saric T., 2015, 'Single and multiple goal optimization of structural steel face milling process considering different methods of cooling/lubricating';
- [Sakurai, et al, 2000] Sakurai K., Adachi K., Kawai G., Sawai T. e Ogawa K., 2000, 'High feed rate drilling of aluminium alloy', *Mater. Sci. Forum*, Vol.331-337, No.1, pp.625-630;
- [Sofronas, e Taraman, 1976] Sofronas A. e Taraman K., 1976, 'Model development for exit burr thickness as a function of drill geometry and feed', *SME tech Pap*;
- [Srinivas e Kalyanmoy, 1994] Srinivas N., Kalyanmoy D., 1994, 'Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms', *J. Evol. Comput.*, 2(3) 221-248;
- [Stephenson e Agapiou, 1997] Stephenson A., e Agapiou S., 1997, 'Metal Cutting Theory and Practice', Marcel Dekker;
- [Stein e Dornfeld, 1997] Stein J. e Dornfeld D., 1997, 'Burr formation in drilling miniature holes', *CIRP Ann – Manuf Technol* 46-63;
- [Stone, et al, 2013] Stone I., McKay B. e Fan G., 2013, 'Light Metals Technology', ISBN: 978-3-03785-766-3, TransTech Publications Inc.;
- [Tonshoff, et al, 1994] Tonshoff H., Spintig W., König W. e Neises A., 1994, *Ann. CIRP* 43;
- [Trent, 1977] Trent M., 1977, 'Metal Cutting', Butterworths, London, pp. 139-180.
- [Trent, et al, 2000] Trent M., Paul K. e Wright P., 2000, 'Metal cutting', Elsevier Inc.;
- [Yih-Fong, Fu-Chen, 2006] Yih-Fong T., Fu-Chen C., 2006, 'Multiobjective process optimisation for turning of tool steels', *Int. J. Machin. Machinab. Mat.* 1 (1), 76-93;
- [Zitoun, et al, 2013] Zitoun R., Krishnaraj V. e Davim P., 2013, 'Machining of Titanium Alloys and Composites for Aerospace Applications', ISBN: 978-3-03785-730-4, TransTech Publications Inc.;

Anexos

Anexo A.1 – Resultados da Rugosidade

Vc	f	Lubrificação	Ra				Rt				Rz			
			Média	Médio	Desvio	Erro	Média	Médio	Desvio	Erro	Média	Médio	Desvio	Erro
110	0,25	0	0,61	0,62	0,012	1,9%	5,81	5,81	0,009	0,2%	4,04	4,11	0,092	2,2%
110	0,25	0	0,62				5,82				4,17			
30	0,25	0	1,34	1,24	0,131	10,5%	16,38	13,75	3,724	27,1%	10,01	8,97	1,460	16,3%
30	0,25	0	1,15				11,11				7,94			
70	0,20	0	1,12	1,06	0,075	7,1%	10,65	10,20	0,627	6,1%	7,57	7,12	0,629	8,8%
70	0,20	0	1,01				9,76				6,68			
110	0,15	0	0,62	0,62	-	-	6,28	6,28	-	-	4,13	4,13	-	-
110	0,15	0	0,62				6,28				4,13			
30	0,15	0	0,75	0,71	0,059	8,3%	7,38	7,13	0,358	5,0%	5,28	4,93	0,495	10,0%
30	0,15	0	0,67				6,87				4,58			
110	0,25	1	0,98	1,02	0,059	5,8%	7,72	8,00	0,391	4,9%	5,79	6,12	0,457	7,5%
110	0,25	1	1,06				8,27				6,44			
30	0,25	1	1,58	1,63	0,061	3,8%	11,73	12,14	0,570	4,7%	8,71	8,90	0,270	3,0%
30	0,25	1	1,67				12,54				9,10			
70	0,20	1	1,31	1,31	0,002	0,2%	10,66	10,57	0,127	1,2%	7,78	7,83	0,059	0,8%
70	0,20	1	1,30				10,48				7,87			
110	0,15	1	0,76	0,76	0,002	0,3%	6,58	6,36	0,311	4,9%	4,98	4,88	0,144	2,9%
110	0,15	1	0,76				6,14				4,78			
30	0,15	1	0,92	0,94	0,024	2,5%	7,60	7,77	0,240	3,1%	5,63	5,94	0,431	7,3%
30	0,15	1	0,95				7,94				6,24			

Tabela A.1 – Resultados da Rugosidade segundo os parâmetros recomendados.

Vc	f	Lubrificação	Ra				Rt				Rz			
			Média	Médio	Desvio	Erro	Média	Médio	Desvio	Erro	Média	Médio	Desvio	Erro
30	1,00	0	1,99	1,31	0,959	73,1%	20,43	13,78	9,407	68,3%	11,59	7,84	5,290	67,4%
30	1,00	0	0,63				7,13				4,10			
50	1,00	0	1,12	1,31	0,269	20,6%	12,53	14,28	2,480	17,4%	7,49	8,34	1,204	14,4%
50	1,00	0	1,50				16,03				9,19			
70	1,00	0	1,24	0,96	0,398	41,4%	9,40	7,26	3,022	41,6%	7,01	5,53	2,105	38,1%
70	1,00	0	0,68				5,13				4,04			
30	1,50	0	1,38	1,43	0,059	4,1%	14,19	14,08	0,156	1,1%	7,62	7,88	0,372	4,7%
30	1,50	0	1,47				13,97				8,14			
30	2,50	0	1,76	1,76	-	-	18,75	18,75	-	-	9,95	9,95	-	-
30	2,50	0	0,61				6,41				16,03			
30	1,00	1	1,08	1,07	0,019	1,8%	14,40	12,54	2,635	21,0%	20,43	13,78	9,407	68,3%
30	1,00	1	1,05				10,67				7,13			
50	1,00	1	0,61	0,67	0,087	13,0%	12,09	9,25	4,012	43,4%	12,53	14,28	2,480	17,4%
50	1,00	1	0,73				6,41				16,03			
70	1,00	1	0,76	0,89	0,186	20,9%	9,16	10,62	2,069	19,5%	9,40	7,26	3,022	41,6%
70	1,00	1	1,02				12,09				5,13			
30	1,50	1	0,99	0,86	0,191	22,2%	9,36	9,87	0,721	7,3%	14,19	14,08	0,156	1,1%
30	1,50	1	0,72				10,38				13,97			
30	2,50	1	1,64	1,26	0,534	42,3%	13,98	10,78	4,525	42,0%	18,75	18,75	-	-
30	2,50	1	0,89				7,58				18,75			

Tabela A.2 – Resultados da Rugosidade para avnços elevados.

$$Erro = \frac{Desvio}{Médio}$$

Anexo A.2 – Resultados do Diâmetro e Rebarba

Vc	f	Lubrificação	Diâmetro				M Rebarba T			
			Medida	Média	Desvio	Erro	Medida	Média	Desvio	Erro
110	0,25	0	5,294	5,617	0,457	8,1%	0,051	0,102	0,071	70,1%
110	0,25	0	5,940				0,152			
30	0,25	0	5,240	5,324	0,119	2,2%	0,054	0,065	0,016	24,7%
30	0,25	0	5,408				0,076			
70	0,20	0	5,480	5,441	0,055	1,0%	0,041	0,044	0,004	8,1%
70	0,20	0	5,402				0,046			
110	0,15	0	5,390	5,342	0,068	1,3%	0,096	0,080	0,023	28,9%
110	0,15	0	5,294				0,064			
30	0,15	0	5,588	5,571	0,024	0,4%	0,062	0,067	0,007	10,6%
30	0,15	0	5,554				0,072			
110	0,25	1	5,506	5,574	0,096	1,7%	0,070	0,060	0,015	24,4%
110	0,25	1	5,642				0,050			
30	0,25	1	5,556	5,536	0,028	0,5%	0,076	0,085	0,013	15,8%
30	0,25	1	5,516				0,095			
70	0,20	1	5,218	5,495	0,392	7,1%	0,067	0,061	0,009	14,8%
70	0,20	1	5,772				0,054			
110	0,15	1	5,394	5,417	0,033	0,6%	0,046	0,085	0,055	65,0%
110	0,15	1	5,440				0,124			
30	0,15	1	5,534	5,541	0,010	0,2%	0,049	0,044	0,008	17,1%
30	0,15	1	5,548				0,039			

Tabela A.3 – Resultados do diâmetro e Rebarba segundo os parâmetros recomendados.

Vc	f	Lubrificação	Diâmetro				M Rebarba T			
			Medida	Média	Desvio	Erro	Medida	Média	Desvio	Erro
30	1,00	0	5,662	5,748	0,121	2,1%	0,151	0,137	0,019	14,1%
30	1,00	0	5,833				0,123			
50	1,00	0	5,460	5,557	0,138	2,5%	0,082	0,113	0,043	38,2%
50	1,00	0	5,655				0,143			
70	1,00	0	5,626	5,562	0,091	1,6%	0,143	0,089	0,076	85,0%
70	1,00	0	5,497				0,036			
30	1,50	0	5,525	5,598	0,104	1,9%	0,095	0,157	0,088	56,0%
30	1,50	0	5,671				0,220			
30	2,50	0	5,442	5,475	0,047	0,9%	0,241	0,272	0,043	16,0%
30	2,50	0	5,509				0,302			
30	1,00	1	5,576	5,662	0,121	2,1%	0,144	0,209	0,091	43,7%
30	1,00	1	5,747				0,273			
50	1,00	1	5,587	5,573	0,019	0,3%	0,208	0,231	0,033	14,5%
50	1,00	1	5,559				0,255			
70	1,00	1	5,471	5,602	0,185	3,3%	0,052	0,260	0,294	113,0%
70	1,00	1	5,733				0,468			
30	1,50	1	5,791	5,657	0,190	3,3%	0,171	0,255	0,118	46,3%
30	1,50	1	5,523				0,338			
30	2,50	1	5,865	5,787	0,110	1,9%	0,501	0,343	0,223	65,1%
30	2,50	1	5,709				0,185			

Tabela A.4 – Resultados do diâmetro e Rebarba para avanços elevados.

Anexo A.3 – Correlações

Correlações não paramétricos								
		Vc	a	Lub	Ra	Rt	Rz	Diametro
tau_b de Kendall	Vc	1,000	0,000	0,000	-,386 [*]	-,497 ^{**}	-,469 [*]	-0,167
	a	0,000	1,000	0,000	,393 [*]	,383 [*]	,398 [*]	0,071
	Lub	0,000	0,000	1,000	0,324	0,145	0,210	0,204
	Ra	-,386 [*]	,393 [*]	0,324	1,000	,853 ^{**}	,888 ^{**}	-0,018
	Rt	-,497 ^{**}	,383 [*]	0,145	,853 ^{**}	1,000	,930 ^{**}	-0,029
	Rz	-,469 [*]	,398 [*]	0,210	,888 ^{**}	,930 ^{**}	1,000	-0,006
	Diametro	-0,167	0,071	0,204	-0,018	-0,029	-0,006	1,000
rô de Spearman	Vc	1,000	0,000	0,000	-,459 [*]	-,600 ^{**}	-,556 [*]	-0,204
	a	0,000	1,000	0,000	0,448	0,426	0,448	0,078
	Lub	0,000	0,000	1,000	0,385	0,173	0,250	0,243
	Ra	-,459 [*]	0,448	0,385	1,000	,960 ^{**}	,978 ^{**}	-0,039
	Rt	-,600 ^{**}	0,426	0,173	,960 ^{**}	1,000	,982 ^{**}	-0,079
	Rz	-,556 [*]	0,448	0,250	,978 ^{**}	,982 ^{**}	1,000	-0,026
	Diametro	-0,204	0,078	0,243	-0,039	-0,079	-0,026	1,000
Correlação de Pearson	Vc	1	0,000	0,000	-,495 [*]	-,566 [*]	-,562 [*]	-0,014
	a	0,000	1	0,000	,487 [*]	,471 [*]	,476 [*]	0,118
	Lub	0,000	0,000	1	0,402	0,013	0,194	0,158
	Ra	-,495 [*]	,487 [*]	0,402	1	,861 ^{**}	,945 ^{**}	-0,109
	Rt	-,566 [*]	,471 [*]	0,013	,861 ^{**}	1	,971 ^{**}	-0,294
	Rz	-,562 [*]	,476 [*]	0,194	,945 ^{**}	,971 ^{**}	1	-0,207
	Diametro	-0,014	0,118	0,158	-0,109	-0,294	-0,207	1
*. A correlação é significativa no nível 0,05 (bilateral).								
**. A correlação é significativa no nível 0,01 (bilateral).								
Correlação	τ de Kendall				ρ de Spearman			
Resposta	Ra	Rt	Rz	Diâmetro	Ra	Rt	Rz	Diâmetro
Vc	-,386 [*]	-,497 ^{**}	-,469 [*]	-0,167	-,459 [*]	-,600 ^{**}	-,556 [*]	-0,204
a	,393 [*]	,383 [*]	,398 [*]	0,071	0,448	0,426	0,448	0,078
Lub	0,324	0,145	0,210	0,204	0,385	0,173	0,250	0,243
*. A correlação é significativa no nível 0,05 (bilateral).								
**. A correlação é significativa no nível 0,01 (bilateral).								

Tabela A.5 – Correlações para ensaios segundo os parâmetros recomendados.

Correlações								
		Vc	a	Lub	Ra	Rt	Rz	Diametro
tau_b de Kendall	Vc	1,000	-,571**	0,000	-,413*	-,505**	-0,116	0,137
	a	-,571**	1,000	0,000	0,249	0,267	-0,060	0,069
	Lub	0,000	0,000	1,000	-,615**	-,453*	-,560**	-0,305
	Ra	-,413*	0,249	-,615**	1,000	,721**	,569**	0,203
	Rt	-,505**	0,267	-,453*	,721**	1,000	,590**	0,052
	Rz	-0,116	-0,060	-,560**	,569**	,590**	1,000	0,033
	Diametro	0,137	0,069	-0,305	0,203	0,052	0,033	1,000
rô de Spearman	Vc	1,000	-,625**	0,000	-,493*	-,627**	-0,168	0,165
	a	-,625**	1,000	0,000	0,301	0,321	-0,084	0,110
	Lub	0,000	0,000	1,000	-,733**	-,539*	-,668**	-0,364
	Ra	-,493*	0,301	-,733**	1,000	,882**	,783**	0,290
	Rt	-,627**	0,321	-,539*	,882**	1,000	,784**	0,069
	Rz	-0,168	-0,084	-,668**	,783**	,784**	1,000	0,090
	Diametro	0,165	0,110	-0,364	0,290	0,069	0,090	1,000
Correlação de Pearson	Vc	1	-,563**	0,000	-,477*	-,583*	-0,168	0,131
	a	-,563**	1	0,000	0,246	0,310	-0,019	0,247
	Lub	0,000	0,000	1	-,714**	-,580*	-,625**	-0,365
	Ra	-,477*	0,246	-,714**	1	,859**	,776**	0,352
	Rt	-,583*	0,310	-,580*	,859**	1	,829**	0,242
	Rz	-0,168	-0,019	-,625**	,776**	,829**	1	0,218
	Diametro	0,131	0,247	-0,365	0,352	0,242	0,218	1
**. A correlação é significativa no nível 0,01 (bilateral).								
*. A correlação é significativa no nível 0,05 (bilateral).								
Correlação	τ de Kendall				ρ de Spearman			
Resposta	Ra	Rt	Rz	Diâmetro	Ra	Rt	Rz	Diâmetro
Vc	-0,413	-0,505	-0,116	0,137	-0,493	-0,627	-0,168	0,165
a	0,249	0,267	-0,060	0,069	0,301	0,321	-0,084	0,110
Lub	-0,615	-0,453	-0,56	-0,305	-0,733	-0,539	-0,668	-0,364
*. A correlação é significativa no nível 0,05 (bilateral).								
**. A correlação é significativa no nível 0,01 (bilateral).								

Tabela A.6 – Correlações para ensaios em avanços elevados.